



**BAUSTEINE  
DER  
HEIZUNGSTECHNIK**  
BERECHNUNG · SOFTWARE

Glück

**Sicherheitsventile**

---

# **BAUSTEINE DER HEIZUNGSTECHNIK**

**Berechnung · Software**

---

**Bernd Glück**

# **SICHERHEITSVENTILE**



**VEB Verlag für Bauwesen · Berlin**

# Vorwort

Die Sicherheitsventile stellen in heizungstechnischen Anlagen die wichtigste Sicherheitsvorrichtung gegen unzulässigen inneren Überdruck dar.

Üblicherweise geben die technischen Regelwerke aber nur über die Bemessung der Ventilverquerschnitte klassischer Belastungsfälle Auskunft. Außerdem gehören die Auswahlalgorithmen für Sicherheitsventile nicht oder nur in sehr kurz gefaßter Form zum Lehrstoff für Heizungstechniker. Deshalb wirft die praktische Bemessung zahlreiche Fragen auf, die in den vergangenen Jahren - aufgrund früherer Publikationen - in vielfältigster Form an mich herangetragen wurden.

Um zu den relevanten Problemen Stellung zu nehmen, sind

- die kausalen Zusammenhänge in theoretischer Form mit praktischem Bezug darzustellen,
- die neuesten technischen Vorschriften einzuarbeiten und
- die modernen Projektierungstechnologien zu berücksichtigen.

Es wird versucht, diesem hohen Anspruch mit den vier Hauptabschnitten

- Ermittlung der Lastannahmen für Anlagenteile
  - Lastzuordnung der Einzelbelastungen im Rahmen des sicherheitstechnischen Konzeptes der Gesamtanlage
  - Bemessung des Sicherheitsventil-Querschnittes
  - Nachrechnung der Zu- und Abblaseleitungen
- nahezukommen.

Bezüglich der Anlagensicherheit kann es selbstverständlich keine Kompromisse geben. Dennoch sind Überlegungen zur konstruktiven Realisierbarkeit der Forderungen, mögliche sekundäre Auswirkungen - beispielsweise durch hohe Wasserverluste in Heizwassernetzen - und wirtschaftliche Erwägungen einbezogen. Zweifel an speziellen Berechnungsvorschriften sowie zukünftig zu erwartende Forderungen werden genannt.

In der Reihe "Bausteine der Heizungstechnik" sind in den bisher erschienenen drei Bänden

"Zustands- und Stoffwerte (Wasser - Dampf - Luft); Verbrennungsrechnung"

"Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung; Druckverluste"

"Wärmeübertragung; Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren"

ISBN 3-345-00426-7

1. Auflage

© VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1990  
VLN 152

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckerei "Thomas Müntzer",

Baß Langensalza, 5820

Lektor: Dipl.oec. Heinz Rauschenbach

Hersteller: Simone Ollrog

Einbandgestaltung: Dietrich Otte

DK 697. LSV 3775

Bestellnummer: 562 615 4

02460

die Grundlagen des Fachgebietes behandelt worden. Im vorliegenden Titel wird die bewährte dreistufige Darstellungsform des Stoffes

- theoretische Ableitung mit ausführlicher Erläuterung
- abschnittsweise Zuordnung von praxisorientierten Beispielen
- rechentechnische Algorithmierung

beibehalten und in vielfältiger Weise auf die ersten Bände - bis zur Übernahme von Unterprogrammen - bezogen, ohne jedoch eine unbedingte Kenntnis vorauszusetzen.

Den Mitarbeitern des VEB Forschung und Rationalisierung Technische Gebäudeausrüstung Frau H. NICKLISCH, Frau U. RANK und Herrn U. DÖHLING gebührt für das sorgfältige Schreiben der Fahren, das Anfertigen der Zeichnungen und der Programmierung der im Buch vorgestellten Algorithmen mein besonderer Dank.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch den Gutachtern Herrn Dr.-Ing. C. NESTKE - Institut Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik der Bauakademie -, Herrn Oberingenieur H. KÜFFNER, Dipl.-Ing. R. DAMM und Dipl.-Ing. V. STEINHÄUSER - VEB Bau- und Montagekombinat Erfurt, Industrieprojektierung Jena für die kritische Durchsicht des Manuskriptes, die gegebenen Hinweise und die anregenden Fachdiskussionen.

Von eminenter Bedeutung war für mich die dankenswerte Unterstützung durch Herrn Dipl.-Ing. B. STROBEL, 1. Stellvertreter des Generaldirektors im VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung, der das Erscheinen der gesamten Reihe - insbesondere auch diesen Titel - befürwortete und mit großem Engagement und Weitblick zahlreiche Probleme lösen half.

Schließlich sei dem Verlag - besonders dem Lektor Herrn Dipl.-Ök. H. RAUSCHENBACH - für die gute Zusammenarbeit gedankt.

Bernd Glück

## Häufig verwendete Bezeichnungen

**Anlage** bezeichnet die Gesamtheit eines geschlossenen Drucksystems.

Beispiele: Heizungsanlage, Kompressoren- bzw. Pumpstation mit nachgeschaltetem Rohrnetz

**Anlagenteil** definiert einen abgegrenzten Abschnitt einer Anlage. Ist es mit einem Sicherheitsventil oder einer Sicherheitsventil-Doppelanordnung versehen, so handelt es sich um ein abgesichertes Anlagenteil.

Beispiele: Behälter, Rohrnetz, Druckhalteeinrichtung, Druck-reduzierstation

**Lastannahme** - auch **Belastung** des Sicherheitsventils genannt - stellt die für die Bemessung des Sicherheitsventils maßgebenden Eingangsdaten (Abblasestrom, Dichte, Aggregatzustand) bei gegebenem Ansprechdruck dar.

Beispiele: Wasserstrom, Naßdampfstrom, Gasstrom mit den jeweils zugehörigen Dichten

**Lastfall** kennzeichnet die ursachenbezogene Drucksteigerung an einem speziellen Ort der Anlage, die zum Abblasen eines Sicherheitsventils führt.

Beispiele: Ungeregelte Pumpenförderung, Durchströmung eines defekten Druckminderers, Wasserzufluß infolge Rohrbruch

**Lastzuordnung** stellt die einem gesicherten Anlagenteil technisch begründete Zuordnung des Lastfalles dar.

Beispiele: Ungeregelte Pumpenförderung und Durchströmung eines defekten Druckminderers wird dem abgesicherten Ausdehnungsgefäß übertragen, Wasserzufluß infolge Rohrbruch wird dem abgesicherten Wärmeübertrager zugeordnet

**Sicherheitsventil-Doppelanordnung** bezeichnet die Anordnung von zwei Sicherheitsventilen in unterschiedlicher Höhenlage am Anlagenteil mit differenzierter Lastannahme.

**Ansprechdruck**  $p_A$  ist der Druck vor dem Sicherheitsventil, bei dem der Ventilkegel zu öffnen beginnt.

**Öffnungsdruck**  $p_{\text{öff}}$  ist der Druck, bei dem der volle Kegelhub erreicht wird. Bei einem Vollhub-Sicherheitsventil kennzeichnet er den Enddruck beim schlagartigen Öffnen.

**Schließdruck**  $p_{\text{sch}}$  charakterisiert den Druck, bei dem das aktivierte Sicherheitsventil wieder geschlossen hat.

**Gegendruck**  $p_G$  ist der auf der Austrittsseite des Sicherheitsventils während des Abblasevorgangs anstehende Druck.

# Inhaltsverzeichnis

|        |                                                                        |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.     | Begriffe und Betrachtungsweise . . . . .                               | 10  |
| 2.     | Lastannahmen für Sicherheitsvorrichtungen an Anlagenteilen . . . . .   | 13  |
| 2.1.   | Ansprechdrücke und Grundsätze zur Lastannahme . . . . .                | 14  |
| 2.1.1. | Algorithmus . . . . .                                                  | 14  |
| 2.1.2. | Unterprogramm . . . . .                                                | 26  |
| 2.1.3. | Beispiel . . . . .                                                     | 32  |
| 2.2.   | Zuströmung von Wasser durch Pumpenförderung . . . . .                  | 34  |
| 2.2.1. | Algorithmus . . . . .                                                  | 35  |
| 2.2.2. | Unterprogramm . . . . .                                                | 40  |
| 2.2.3. | Beispiel . . . . .                                                     | 44  |
| 2.3.   | Zuströmung von Wasser über ein Stellventil . . . . .                   | 47  |
| 2.3.1. | Algorithmus . . . . .                                                  | 48  |
| 2.3.2. | Unterprogramm . . . . .                                                | 55  |
| 2.3.3. | Beispiel . . . . .                                                     | 59  |
| 2.4.   | Zuströmung von Druckmedium über eine Drosselstelle . . . . .           | 61  |
| 2.4.1. | Algorithmus . . . . .                                                  | 62  |
| 2.4.2. | Unterprogramm . . . . .                                                | 68  |
| 2.4.3. | Beispiel . . . . .                                                     | 72  |
| 2.5.   | Zuströmung von Wasser durch Rohrbruch . . . . .                        | 77  |
| 2.5.1. | Algorithmus . . . . .                                                  | 78  |
| 2.5.2. | Unterprogramm . . . . .                                                | 80  |
| 2.5.3. | Beispiel . . . . .                                                     | 80  |
| 2.6.   | Zuströmung von Dampf durch Rohrbruch . . . . .                         | 85  |
| 2.6.1. | Algorithmus . . . . .                                                  | 86  |
| 2.6.2. | Unterprogramm . . . . .                                                | 87  |
| 2.6.3. | Beispiel . . . . .                                                     | 87  |
| 2.7.   | Volumenexpansion durch Wärmezufuhr (Heizung) . . . . .                 | 90  |
| 2.7.1. | Algorithmen . . . . .                                                  | 94  |
| 2.7.2. | Unterprogramme . . . . .                                               | 107 |
| 2.7.3. | Beispiele . . . . .                                                    | 124 |
| 3.     | Lastzuordnungen für Sicherheitsvorrichtungen in Anlagen . . . . .      | 132 |
| 3.1.   | Anschlußorte und Ansprechdrücke der Sicherheitsvorrichtungen . . . . . | 133 |
| 3.1.1. | Anschlußorte . . . . .                                                 | 133 |
| 3.1.2. | Druckschaubilder . . . . .                                             | 136 |
| 3.1.3. | Ansprechdrücke . . . . .                                               | 140 |
| 3.1.4. | Qualität und Grenzen der Absicherung . . . . .                         | 147 |
| 3.1.5. | Beispiel . . . . .                                                     | 150 |
| 3.2.   | Anlagenspezifische, kombinierte Lastannahmen . . . . .                 | 156 |

|        |                                                                               |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1. | Zuströmung von Wasser über eine Pumpe-Stellventil-Kombination . . . . .       | 156 |
| 3.2.2. | Zuströmung von Wasser über eine Pumpe-Stellventil-Pumpe-Kombination . . . . . | 162 |
| 3.3.   | Lastzuordnungen . . . . .                                                     | 163 |
| 3.3.1. | Vorschläge für typische Schaltungen . . . . .                                 | 163 |
| 3.3.2. | Rechentchnische Abarbeitung . . . . .                                         | 170 |
| 3.3.3. | Beispiel . . . . .                                                            | 174 |
| 4.     | Sicherheitsventile . . . . .                                                  | 180 |
| 4.1.   | Einteilung und Funktionsweise . . . . .                                       | 181 |
| 4.1.1. | Proportionalsicherheitsventil . . . . .                                       | 183 |
| 4.1.2. | Vollhubsicherheitsventil . . . . .                                            | 185 |
| 4.1.3. | Normalsicherheitsventil . . . . .                                             | 186 |
| 4.2.   | Bemessung . . . . .                                                           | 187 |
| 4.2.1. | Definition der Berechnungsgrößen . . . . .                                    | 187 |
| 4.2.2. | Abblasen von Flüssigkeiten . . . . .                                          | 193 |
| 4.2.3. | Abblasen von Gasen und Dämpfen . . . . .                                      | 195 |
| 4.2.4. | Abblasen von Heißwasser . . . . .                                             | 201 |
| 4.2.5. | Abblasen von ungesättigtem Wasserdampf (Naßdampf) . . . . .                   | 205 |
| 4.2.6. | Quantitativer Vergleich der Berechnungsmodelle für Wasser und Dampf . . . . . | 207 |
| 4.2.7. | Beispiele . . . . .                                                           | 210 |
| 4.3.   | Auswahlalgorithmus . . . . .                                                  | 217 |
| 4.3.1. | Dateien und Hauptprogramm . . . . .                                           | 218 |
| 4.3.2. | Unterprogramme zur Querschnittsbemessung . . . . .                            | 235 |
| 4.3.3. | Beispiele . . . . .                                                           | 238 |
| 5.     | Einbaubedingungen für Sicherheitsventile . . . . .                            | 242 |
| 5.1.   | Installationsgrundsätze . . . . .                                             | 242 |
| 5.2.   | Bemessung der Zuleitung . . . . .                                             | 245 |
| 5.2.1. | Zulässiger Druckverlust . . . . .                                             | 245 |
| 5.2.2. | Nachweis des Druckverlustes . . . . .                                         | 246 |
| 5.2.3. | Beispiele . . . . .                                                           | 249 |
| 5.3.   | Bemessung der Abblaseleitung . . . . .                                        | 253 |
| 5.3.1. | Zulässiger Gegendruck . . . . .                                               | 253 |
| 5.3.2. | Nachweis des Gegendruckes . . . . .                                           | 254 |
| 5.3.3. | Beispiele . . . . .                                                           | 262 |
| 5.4.   | Nachweisalgorithmus . . . . .                                                 | 267 |
| 5.4.1. | Hauptprogramm . . . . .                                                       | 268 |
| 5.4.2. | Unterprogramm zur Druckberechnung . . . . .                                   | 284 |
| 5.4.3. | Beispiele . . . . .                                                           | 292 |
| 6.     | Anhang . . . . .                                                              | 294 |
| 6.1.   | Zustands- und Stoffwertmodule . . . . .                                       | 294 |
| 6.2.   | Wärmeleistung und Wärmedurchgangskoeffizient . . . . .                        | 297 |
| 7.     | Literaturverzeichnis . . . . .                                                | 300 |
| 8.     | Sachwörterverzeichnis . . . . .                                               | 303 |

# 1. Begriffe und Betrachtungsweise

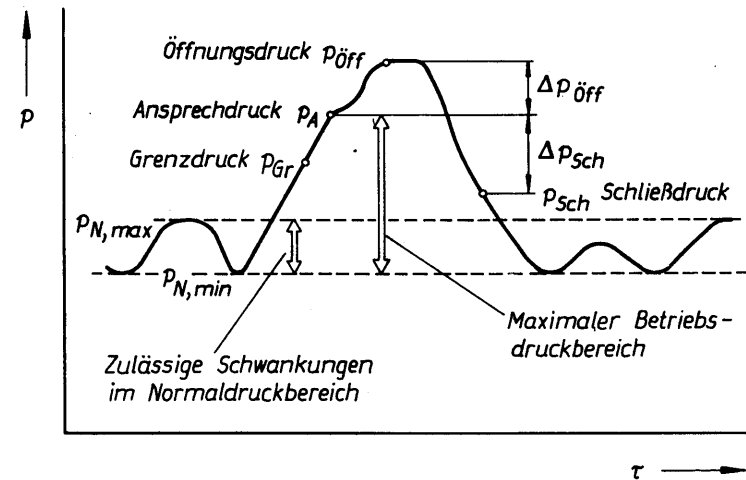
Um einen gefahrlosen Betrieb von technischen Anlagen mit innerem Überdruck zu gewährleisten, sind entsprechende **Sicherheitsvorrichtungen** unabsperrbar zu installieren. Es werden darunter **Sicherheitsventile (SV)**, **Sicherheitsabsperrventile**, **Sicherheitsüberströmventile**, **Berstellamente**, **Sicherheitsstandrohre** sowie **Sicherheitsvor- und -rücklaufleitungen** mit Ausdehnungsgefäßen verstanden. Über die Anordnung dieser Vorrichtungen und die zu beachtenden Gefahrensituationen gibt es eine Vielzahl von Normen, Vorschriften und Hinweisen, die länderspezifisch gelten und zeitlichen Änderungen unterliegen. In der Regel fehlen aber Angaben zur genauen Ermittlung der Lastannahmen. Es sind deshalb die **physikalisch-technischen Sachverhalte**, die zur Drucksteigerung in den **Anlagenteilen** führen können, zu untersuchen. Sie werden **Lastfall** genannt. Unter Bezugnahme auf den Anbringungsort der Sicherheitsvorrichtung ist deren **Belastung**, die auch als **Lastannahme** bezeichnet wird, zu ermitteln.

Die **Anlage** enthält meistens mehrere Anlagenteile, die eine Drucksteigerung betriebsbedingt verursachen können. Deshalb muß ein **Gesamtsicherungskonzept**, das beispielsweise mehrere örtlich verteilte, mit unterschiedlichen Einstelldrücken versehene Sicherheitsventile, Verriegelungen u.a.m. einschließt, erarbeitet werden. Im Rahmen der **Lastzuordnung** sind die einzelnen Lastfälle auf die abgesicherten Anlagenteile technisch sinnvoll aufzuteilen.

Grundsätzlich wird bei der Lastermittlung stets nur **ein gleichzeitig wirkender Havariefall** angenommen und bei der Bemessung **keine Redundanz** vorgesehen. Diese Konventionen sind anlagenspezifisch mit den zuständigen technischen Überwachungsbehörden zu klären (vgl. auch /1/).

In einigen Fällen sind die Annahmen unsicher und einige technische Abläufe - z.B. das Abblasen von Siedewasser - noch nicht eindeutig geklärt. In diesen Fällen werden häufig die ungünstigsten Annahmen für die Auswahl der Sicherheitsvorrichtungen herangezogen. Dieses Vorgehen ist aus der Sicht der Anlagensicherheit jedoch nicht immer zweckmäßig, da bei zu großen Ventilquerschnitten mitunter Pulsationen im Medienstrom und das materialverschleißende Flattern von Ventilkegeln im Ansprechfall auftreten können /2/. Als Abhilfe kann zunächst nur empfohlen werden, den errechneten Ventilquerschnitt auf mehrere Sicherheitsventile mit gestaffelten Ansprechdrücken aufzuteilen und, wenn möglich, Sicherheitsabsperrventile einzusetzen.

Die Arbeitsweise der Sicherheitsvorrichtungen wird durch drei relevante Drücke markiert. Beim **Ansprechdruck** ( $\equiv$  Abblasedruck)  $p_A$  beginnt das Ventil zu öffnen, bis beim **Öffnungsdruck**  $p_{\text{Öff}}$  der volle Kegelhub erreicht ist. Der Ventilquerschnitt muß so bemessen sein, daß im Havariefall kein weiterer Druckanstieg auftreten kann. Das Ventil schließt bei dem unter dem Ansprechdruck  $p_A$  liegenden **Schließdruck**  $p_{\text{Sch}}$  (Bild 1.1).



**Bild 1.1** Kennzeichnung der Drücke und Druckbereiche an Hand eines möglichen, zeitabhängigen Druckverlaufs in einem mit einer Sicherheitsvorrichtung versehenen Anlagenteil

Um das Ansprechen der Sicherheitsvorrichtung auf den äußersten Gefahrenfall zu begrenzen, werden **Regel Einrichtungen** installiert, die den Betrieb im **Normaldruckbereich** zwischen  $p_{N,min}$  und  $p_{N,max}$  gewährleisten. Versagt diese Regelung, so ist der weitere Betrieb prinzipiell noch bis zum Ansprechdruck möglich. Zusätzlich wird vielfach eine Druckbegrenzungseinrichtung vorgesehen, die zwischen  $p_{N,max}$  und  $p_A$  - beispielsweise beim **Grenzdruck**  $p_{Gr}$  - wirksam wird. Sie schaltet das außerhalb des Normaldruckbereiches arbeitende Anlagenteil ab. Ist eine Wiederinbetriebnahme erst nach Beseitigung der Ursachen, die zu dem unkontrollierten Druckanstieg führten, von Hand möglich, so spricht man von einem **Sicherheitsbegrenzer**.

Der Zusammenhang zwischen **Berechnungsdruck**  $p_B$ , **maximalem Anlagendruck**  $p_{Anl}$  und **Ansprechdruck**  $p_A$  wird durch die Beziehung

$$p_B \cong p_{Anl} \cong p_A \quad (1.1)$$

hergestellt. Nach den meisten Vorschriften /3,4,5/ (Druckbehälter, Kessel, Rohrleitungen) darf der Öffnungsüberdruck den Berechnungsüberdruck bis 10 % überschreiten. Leider gilt diese eindeutige Definition nicht für alle Anlagenteile (Raumheizkörper, Armaturen).

Der maximale Anlagendruck ist unter Beachten der Regelungstoleranzen, der Sicherheitszuschläge (vgl. /6, S. 200 u.f./) und der Berechnungsdrücke zusammengesetzter Anlagenteile festzulegen. Er dient als Bezugsgröße für die Ermittlung des Ansprechdruckes.

Die im weiteren vorgeschlagenen Lösungswege (Algorithmen) werden stets zur Programmierung in Form von Datenflußplänen aufbereitet und als Unterprogramm deklariert.

Sie sind selbstverständlich separat nutzbar, jedoch auch zu größeren Programmkomplexen verknüpfbar. Entsprechende Hauptprogramme werden zusammengefaßt angegeben. Die Variablennamen in den Ableitungen sind mit den in den Flußbildern verwendeten Bezeichnungen in der Regel identisch, lediglich die Indizes stehen bei EDV-gerechter Schreibweise auf Zeilenhöhe. Laufvariable werden in eckigen Klammern angefügt. Die Eingabegrößen sind jeweils erläutert und mit der erforderlichen Einheit ausgewiesen.

Logische Kontrollen der Eingabewerte und die spezielle Dialogführung können individuell ergänzt werden.

Die Ausgabekommentare zu den berechneten Größen sind in den Flußplänen enthalten.

Die Zustands- und Stoffwertapproximationen sind als separate Module formuliert. Sie finden sich im Anhang. Den Gleichungsnummern ist ein A vorangestellt.

#### Beachte!

Im gesamten Textteil, im Bildmaterial und in den Datenflußplänen werden die Drücke  $p$  stets als absolute Drücke verstanden.

Der Atmosphärendruck sei mit  $p_a = 0,1 \text{ MPa}$  angenommen.

## 2. Lastannahmen für Sicherheitsvorrichtungen an Anlagenteilen

Behälter, wärmetechnische Apparate und Rohrleitungssysteme können durch verschiedene Einwirkungen eine Drucksteigerung erfahren. Die wichtigsten Lastfälle werden am Beispiel eines abzusichernden Behälters (Bild 2.1), der mit Wasser und einem gas- oder dampfförmigen Auflastmedium gefüllt ist, betrachtet. Ein Sicherheitsventil SV1 sei druckmedienseitig, ein weiteres SV2 wasserseitig angeordnet.

Prinzipiell ist für einen homogenen Druckraum ein Sicherheitsventil ausreichend. Die gezeigte Doppelanordnung sei jedoch allgemeingültig erläutert. Die Ergebnisse sind auch auf getrennte Druckräume (Membrangefäße) anwendbar.

Für alle relevanten Störfälle, wie beispielsweise durch unregelmäßige Pumpenförderung, defekte Druckminderer usw. verursacht, werden die Lastannahmen für vier verschiedene Absicherungsvarianten nachfolgend ermittelt. Die für den mit zwei verschiedenen Medien gefüllten Behälter geltenden Überlegungen vereinfachen sich natürlich bei homogener Füllung, beispielsweise bei der Absicherung eines Wärmeübertragers oder eines Druckluftnetzes nach einer Druckreduzierarmatur. Um nicht für jeden dieser Fälle einen eigenen Algorithmus programmieren zu müssen, werden - ausgehend von der umfassenden "Behälterversion" - lediglich spezielle Eingabemöglichkeiten für eine vereinfachte Programmabarbeitung angegeben. Interessieren den Anwender grundsätzlich nur einige vereinfachte Algorithmen, so sind diese natürlich auch aus dem komplexen Modell ableitbar.

Um eine Sicherheitsvorrichtung bemessen zu können, müssen Ansprechdruck, die abzublasenden Masseströme sowie deren Dichten bekannt sein. Da die Abblaseströme in vielen Fällen funktionell vom Ansprechdruck abhängen, muß dieser zuerst ermittelt werden.

In der Heizungstechnik ist es üblich, die Abblaseströme auf der Grundlage hydro- oder gasdynamischer Kausalitäten der relevanten, druckbeeinflussenden Baugruppen ohne Beachten der Rohrreibungsdruckverluste zu bestimmen; d.h., man betrachtet den Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Förderhöhe einer Pumpe, den Massestrom durch ein Stellventil oder eine Blende in Abhängigkeit des Differenzdruckes usw. Diese Zugehörigkeiten sind mit großer Genauigkeit bekannt und beeinflussen jeweils dominierend die Größe des Stoffstromes. Die zusätzliche Berücksichtigung der Druckverluste durch Rohrreibung und diverse Einzelwiderstände würde in der Regel zu kleineren Durchsätzen und somit zu reduzierten Lastannahmen für die Sicherheitsventile führen. Aus sicherheitstechnischer Sicht wären allerdings die Minimalwerte für saubere, glatte und evtl. neue Rohrleitungen anzusetzen. Entsprechende Annahmen sind schwierig zu ermitteln und bleiben relativ unsicher. Für diese Verhältnisse wäre eine spezielle Druck-

verlustberechnung erforderlich. Die übliche Druckverlustberechnung, die den funktionellen Betrieb der Anlage gewährleisten muß, liefert bedeutend höhere Werte. Sie ist für sicherheitstechnische Betrachtungen nicht verwendbar.

Im weiteren bleiben die Druckverluste, die beim Durchströmen der Rohrleitungen auftreten, unbeachtet. Dadurch vereinfacht sich die Rechnung bedeutend, und zusätzliche Sicherheiten sind gegeben.

Das Berücksichtigen der Minimaldruckverluste ist jedoch grundsätzlich zulässig.

## 2.1. Ansprechdrücke und Grundsätze zur Lastannahme

### 2.1.1. Algorithmus

Bezugnehmend auf Bild 2.1 ist der Ansprechdruck des Sicherheitsventils SV1 aus der Druckbilanz

$$p_{Anl} \cong \rho_W g H_W + \rho_D g H_D + p_{A,1} \quad (2.1)$$

bestimmbar. Es bedeuten:

|           |                             |
|-----------|-----------------------------|
| $p_{Anl}$ | Zulässiger Anlagendruck     |
| $\rho_W$  | Dichte des Wassers          |
| $\rho_D$  | Dichte des Druckmediums     |
| $H_W$     | Wasserstand im Behälter     |
| $H_D$     | Höhe des Druckmedierraumes. |

Damit gilt für den Ansprechdruck

$$p_{A,1} \cong p_{Anl} - g (\rho_W H_W + \rho_D H_D). \quad (2.2)$$

Vergleicht man die hydrostatischen Druckanteile an Hand praktischer Werte, so folgt mit

$$H_W = H_D = 1 \text{ m und}$$

$$\rho_D = 12 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Luft: } p = 1 \text{ MPa; } t = 20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$\rho_D = 5 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Sattdampf: } p = 1 \text{ MPa})$$

$$\rho_W = 998 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Wasser: } t = 20 \text{ }^\circ\text{C})$$

für die Druckmediensäule

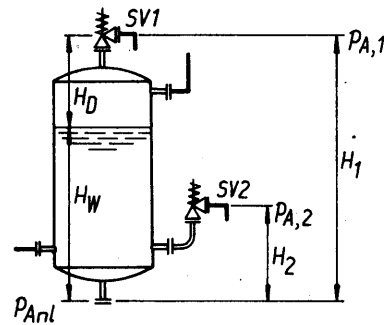
$$g \rho_D H_D = 9,81 \cdot 12 \cdot 1 \text{ Pa} = 118 \text{ Pa}$$

bzw. für die Wassersäule

$$g \rho_W H_W = 9,81 \cdot 998 \cdot 1 \text{ Pa} = 9\,790 \text{ Pa.}$$

Dies sind, bezogen auf den Ansprechdruck von 1 MPa: 0,01 % bzw. 1 %.

Man kann also den durch die Druckmediensäule bewirkten Druck ohne praktischen Fehler



**Bild 2.1** Behälter mit Sicherheitsventilen am Druckmedierraum (SV1) und am Wasserraum (SV2). Die Höhen und die Lage der Druckebenen sind vermerkt.

vernachlässigen. Für die Wassersäule ist der Größtwert einzusetzen, so daß sich für den Ansprechdruck die Gl. (2.2) zu

$$p_{A,1} \cong p_{Anl} - g \rho_W H_1 \quad (2.3)$$

vereinfacht.

Analog gilt für das Sicherheitsventil SV2

$$p_{A,2} \cong p_{Anl} - g \rho_W H_2. \quad (2.4)$$

Die kleinsten Ansprechdrücke ergeben sich für die größte Dichte  $\rho_W$ , die wiederum zur kleinsten Wassertemperatur  $t_{\min}$  gehört; d.h., es ist zur Festlegung von  $p_{A,1}$  und  $p_{A,2}$  und zur Abstufung der Ansprechdrücke bei Anordnung von zwei Sicherheitsventilen

$$\rho_W = \rho_W(t_{\min})$$

zu setzen.

Zur Absicherung des im Bild 2.1 dargestellten Behälters sind unter praktischen Gesichtspunkten bezüglich **Anordnung** und **Ansprechreihenfolge** der Sicherheitsventile **vier Varianten** zu betrachten.

Für die Bemessung der Sicherheitsventile sind von Interesse:

• **Ansprechdruck**  $p_A$

• **Abzuführende Masseströme**

|                |                  |
|----------------|------------------|
| $\dot{m}_W$    | Wasserstrom      |
| $\dot{m}_{WD}$ | Wasserdampfstrom |
| $\dot{m}_D$    | Druckmediestrom  |

• **Dichte der Masseströme**

|             |                          |
|-------------|--------------------------|
| $\rho_W$    | Dichte des Wassers       |
| $\rho_{WD}$ | Dichte des Wasserdampfes |
| $\rho_D$    | Dichte des Druckmediums. |

Die zusätzlichen Indizes 1 bzw. 2 ( $p_{A,1}$ ;  $p_{A,2}$ ;  $\dot{m}_{W,1}$ ;  $\dot{m}_{W,2}$ ;  $\dot{m}_{WD,1}$ ;  $\dot{m}_{D,1}$ ;  $\varrho_{W,1}$ ;  $\varrho_{W,2}$ ;  $\varrho_{WD,1}$ ;  $\varrho_{D,1}$ ) nehmen auf die Zuordnung zum Sicherheitsventil SV1 bzw. SV2 Bezug. In Vorbereitung auf die automatisierte Bemessung der Sicherheitsventile müssen die Einzelbelastungen gespeichert werden. Deshalb erfolgt dann noch eine weitere Indizierung der Masseströme und Dichten, die die Ursache der Volumenzunahme kennzeichnen:

|   |                                   |                             |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| P | Pumpen (Wasserzufluß)             |                             |
| V | Stellventil (Wasserzufluß)        |                             |
| M | Druckminderer (Druckmedienzufluß) |                             |
| R | Rohrreißer (Wasserzufluß)         | RD Rohrreißer (Dampfzufluß) |
| H | Wärmezufuhr (Heizung).            |                             |

Als Druckmedium wird in der heizungstechnischen Praxis Stickstoff, Luft und Wasserdampf verwendet. Im Abblasefall sei der Massestrom stets mit  $\dot{m}_D$  und die zugehörige Dichte mit  $\varrho_D$  bezeichnet. Der Wasserdampfstrom  $\dot{m}_{WD}$  der Dichte  $\varrho_{WD}$  hat damit nichts zu tun, denn er entsteht beim Phasenwechsel des Wassers infolge Verdampfung durch Beheizen des Behälterinhaltes oder durch Entspannung des zugeführten Wassers. In diesen Fällen ist das Sicherheitsventil stets an der höchsten Stelle des Druckkörpers anzuordnen, d.h., diese Belastungsart ist nur für SV1 bedeutungsvoll.

Die kennzeichnenden Merkmale der vier unterschiedlichen Varianten seien nachfolgend erläutert, wobei vereinfachend der Phasenwechsel zunächst unbeachtet bleibt.

#### Variante 1

Es ist nur das Sicherheitsventil SV1 vorhanden. Der Ansprechdruck  $p_{A,1}$  folgt aus Gl. (2.3). SV1 muß sowohl den Druckmedienzufluß  $\dot{m}_{D,1}$  der Dichte  $\varrho_{D,1}$ , die sich bei kontinuierlicher Durchströmung des Druckmedienraumes einstellt, als auch den Wasserstrom  $\dot{m}_{W,1}$  der Dichte  $\varrho_{W,1} = \varrho_W(t)$  bei einer unzulässigen Drucksteigerung abführen. Bevor aber der Wasserstrom das Sicherheitsventil beaufschlagen kann, ist das darüber liegende Druckmedium abzublasen. Der äquivalente Druckmedienstrom folgt aus der Volumenstromgleichheit zu

$$\dot{m}_{D,1} = \dot{m}_{W,1} \frac{\varrho_{DN}}{\varrho_{W,1}} \quad (2.5)$$

Die Dichte  $\varrho_{DN}$  gilt für den Ansprechdruck  $p_{A,1}$  und die Temperatur des Druckpolsters bei Normalbetrieb  $t_{DN}$ .

#### Variante 2

Der Behälter wird lediglich durch das wasserseitig angeordnete Sicherheitsventil SV2 mit dem Ansprechdruck  $p_{A,2}$ , der durch Gl. (2.4) determiniert ist, abgesichert. Es führt nötigenfalls den Wasserstrom  $\dot{m}_{W,2}$  der Dichte  $\varrho_{W,2} = \varrho_W(t)$  und den Druckme-

dienzufluß  $\dot{m}_{D,2}$  der Dichte  $\varrho_{D,2}$ , die bei kontinuierlicher Durchströmung des Druckmedienraumes vor SV2 ansteht, ab.

Bei Druckmedienzufluß muß allerdings zunächst die Wasservorlage

$$\dot{m}_{W,2} = \dot{m}_{D,2} \frac{\varrho_{WN}}{\varrho_{D,2}} \quad (2.6)$$

abgeleitet werden. Die Dichte des Wassers ist für die normale Behältertemperatur

$$\varrho_{WN} = \varrho_W(t_{WN}) \text{ zu bestimmen.}$$

#### Variante 3 und Variante 4

Druckmedien- und Wasserraum sind getrennt durch die Ventile SV1 und SV2 abgesichert. Sie haben im Ansprechfall die Ströme  $\dot{m}_{D,1}$  und  $\dot{m}_{W,2}$  der Dichten  $\varrho_{D,1}$  und  $\varrho_{W,2}$ , die sich bei Behälterdurchströmung einstellen, abzuführen.

Bezüglich der Wahl der Ansprechdrücke ist vorab festzulegen, welches der beiden Ventile zuerst abblasen soll. Die Entscheidung wird in der Regel von der Verfügbarkeit des Druckmediums abhängig sein.

Gemäß Bild 1.1 bläst das aktivierte Ventil wegen der ihm eigenen Hysterese im Bereich  $p_A \dots p_{\text{Öff}} \dots p_{\text{Sch}}$  ab. Dies bedeutet, daß der höchste Druck (Öffnungsdruck)

$$p_{\text{Öff}} = \omega p_A \quad (2.7)$$

und der niedrigste Druck (Schließdruck)

$$p_{\text{Sch}} = \sigma p_A \quad (2.8)$$

beträgt.

Bei **Variante 3** soll SV1 zuerst in Funktion treten (Druckmedium z.B. Druckluft oder Wasserdampf). Der Ansprechdruck ist somit aus der Ungleichung

$$\omega p_{A,1} + g \varrho_W (H_W - H_2) < p_{A,2}$$

abzuleiten. Bei höchstem Wasserstand wird schließlich der Kleinstwert

$$p_{A,1} < \frac{p_{A,2} - g \varrho_W (H_1 - H_2)}{\omega} \quad (2.9)$$

markiert. Der Ansprechdruck  $p_{A,2}$  ist nach Gl. (2.4) festzulegen.

Bei **Variante 4** soll zuerst SV2 aktiviert werden (Druckmedium z.B. Stickstoff). Während  $p_{A,1}$  gemäß Gl. (2.3) zu ermitteln ist, folgt der Ansprechdruck für SV2 aus der Ungleichung

$$p_{A,1} + g \varrho_W (H_W - H_2) > \omega p_{A,2}$$

für den niedrigsten Wasserstand zu

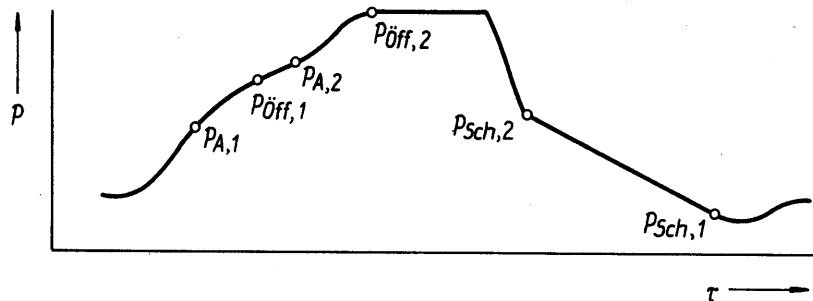
$$p_{A,2} < \frac{p_{A,1}}{\omega} \quad (2.10)$$

**Anmerkung 1**

Die Koeffizienten  $\omega$  und  $\sigma$  sind von der Konstruktion der Sicherheitsventile abhängig. In Abschnitt 4.2. wird näher darauf eingegangen. Im allgemeinen gelten:  $\omega = 1,05 \dots 1,1$ ;  $\sigma = 0,8 \dots 0,9$ .

Bei praktischen Angaben werden diese Koeffizienten oftmals auf die Überdrücke bezogen.

Der Druckverlauf bei Variante 3 könnte sich beispielsweise, wie im Bild 2.2 gezeigt, gestalten. Der Schließdruck von SV2 läge dabei unterhalb von  $p_{\text{Öff},1}$ , möglicherweise sogar unter  $p_{A,1}$ . Wollte man dies ausschließen, so müßte in Gl. (2.9)  $p_{A,2}$  und in Gl. (2.10)  $p_{A,1}$  noch mit  $\sigma$  multipliziert werden. Eine aus der Praxis abgeleitete Notwendigkeit gibt es dafür allerdings nicht.



**Bild 2.2** Möglicher Druckverlauf beim gestaffelten Ansprechen der Sicherheitsventile SV1 und SV2 (Variante 3)

**Anmerkung 2**

Der erforderliche Querschnitt eines Sicherheitsventils berechnet sich bei Wasserabströmung (Index W) zu

$$A_0 = C \frac{\dot{m}_W}{\sqrt{\rho_W}} \quad (*)$$

Fließt der eingespeiste Massestrom  $\dot{m}_W$  mit der Dichte  $\rho_W$  direkt dem Sicherheitsventil zu, ist die Berechnung nach Gl. (\*) exakt. Besteht jedoch vor dem Sicherheitsventil eine stabile Wasservorlage der Dichte  $\rho_{WN}$ , so ergibt sich bei Volumenstromgleichheit

$$\dot{m}_{WN} = \dot{m}_W \frac{\rho_{WN}}{\rho_W},$$

genaugenommen der Querschnitt

$$A_0^* = C \frac{\dot{m}_W}{\sqrt{\rho_{WN}}} \frac{\rho_{WN}}{\rho_W}.$$

Der nach Gl. (\*) berechnete Wert stellt dann nur eine Näherung mit dem prozentualen Fehler

$$\delta_A = \frac{A_0 - A_0^*}{A_0^*} 100 \% = \left( \sqrt{\frac{\rho_W}{\rho_{WN}}} - 1 \right) 100 \%$$

dar. Auf praktische Bedingungen angewandt, ergeben sich beispielsweise:

- Sicherheitsventil unten (SV2); oberer Wasserzufluß;  $t_{WN} = 40^\circ\text{C}$ ;  $t_W = 110^\circ\text{C}$ :  
 $\delta_A = -2,1 \%$
- Sicherheitsventil oben (SV1); unterer Wasserzufluß;  $t_{WN} = 110^\circ\text{C}$ ;  $t_W = 40^\circ\text{C}$ :  
 $\delta_A = +2,2 \%$
- Sind die Temperaturwerte  $t_W$  und  $t_{WN}$  in den vorgenannten Beispielen vertauscht, so verringern sich die Fehler, da aufgrund der Dichteunterschiede eine intensive Mischung von Behälter- und Zuflußwasser erfolgt.

Da ein genaues Erfassen der thermisch- sowie strömungsbedingten Mischeffekte ohnehin nicht möglich ist und die praktisch zu erwartenden Fehler verhältnismäßig klein gegenüber den sonstigen Unwägbarkeiten sind, werden evtl. Dichteunterschiede im Abblasemedium, die zu Beginn des Abblasens auftreten können, nicht beachtet. Diese Aussage gilt sowohl für das Wasser als auch für das Druckmedium.

**Lastannahme bei Phasenwechsel des Zuflußmediums durch Entspannung**

Fließt über eine Drosselstelle, z.B. ein Stellventil, der Wasserstrom  $\dot{m}$  mit der Temperatur  $t_V$  in den mit  $p_A$  abgesicherten Behälter, so tritt dann Nachverdampfung auf, wenn  $p_A$  kleiner als der zu  $t_V$  gehörige Siededruck ist ( $p_A < p_S(t_V)$ ). Diese Aussage gilt wegen der geringen Druckabhängigkeit der Enthalpie des Wassers mit sehr guter Näherung. Der Dampfgehalt des Wasser-Dampf-Gemisches (Naßdampf) berechnet sich zu

$$x_{WD} = \frac{h_W - h_{WS}}{\Delta h_V} \quad (2.11)$$

mit

- $h_W$  Spezifische Enthalpie des Wassers vor der Drosselstelle
- $h_{WS}$  Spezifische Enthalpie des Siedewassers bei  $p_A$  ( $h_{WS} \equiv h'$ )
- $\Delta h_V$  Spezifische Verdampfungsenthalpie bei  $p_A$ .

Die Zustandsgrößen sind den Wasserdampf-Tabellen zu entnehmen oder nach den Gl.n. (A9) bis (A11) des Anhangs zu berechnen.

Erfolgt keine Separation der Gemischkomponenten im Behälter, so handelt es sich bei dem Zuflußstrom  $\dot{m}$  um Naßdampf.

Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Drosselstelle direkt am Behälter-eintritt liegt, keine Wasservorlage existiert und der Gemischstrom eine große Geschwindigkeit besitzt. Ein homogenes Wasser-Dampf-Gemisch ist auch dann zu erwarten, wenn es sich nicht um einen Behälter, sondern um eine Rohrleitung mit vorgeschaltetem Drosselorgan handelt.

Bei Separation der Gemischkomponenten entstehen der Dampfstrom

$$\dot{m}_{WD} = x_{WD} \dot{m}$$

mit der Dichte des Sattedampfes  $\rho_{WD} = \rho_S(p_A) \equiv \rho''$  und der Wasserstrom

$$\dot{m}_W = \dot{m} - \dot{m}_{WD}$$

mit der Dichte des siedenden Wassers  $\rho_W = \rho_W(t_S) = \rho'$ . Diese Stoffströme sind bei Erreichen des Abblasedruckes gleichzeitig abzuführen.

Da die jeweilige Separationswirkung der Behälter nicht voraussehbar ist, wird die Existenz von Naßdampf angenommen und dem Sicherheitsventil an der höchsten Stelle des Druckbehälters SV1 als Belastung zugewiesen.

Befindet sich zusätzlich noch ein Druckmedienpolster im Behälter, so ist die Ermittlung der ungünstigsten Belastung des Sicherheitsventils problematisch. Der Strömungsverlauf im Behälter, die Phasenwandelreaktion und der Ablauf der Mischung können nicht allgemeingültig angegeben werden. Statt dessen seien zwei Gedankenmodelle zur Entscheidung vorgestellt.

Zuerst werden aber die möglichen Dichten errechnet. Nach Gl. (2.11) ergeben sich bei der Entspannung von Heißwasser der Temperatur  $t_V$  auf den Abblasedruck  $p_A$  die Dampfgehalte  $x_{WD}$ :

| $t_V$<br>°C | $p_A$<br>MPa | $x_{WD}$ |
|-------------|--------------|----------|
| 200         | 0,6          | 0,088    |
| 150         | 0,4          | 0,013    |

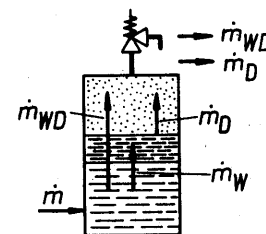
Das heißt, im Bereich der Heizungstechnik sind Dampfgehalte  $x_{WD} < 0,1$  zu erwarten. Die Dichten der Einzelphasen und des Gemisches betragen:

| $p_A$<br>MPa | $t_S(p_A)$<br>°C | $\rho_W \equiv \rho'$<br>kg/m <sup>3</sup> | $\rho_{WD} \equiv \rho''$<br>kg/m <sup>3</sup> | $\rho_{x=0,01}$<br>kg/m <sup>3</sup> | $\rho_{x=0,1}$<br>kg/m <sup>3</sup> |
|--------------|------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,4          | 144              | 923                                        | 2,16                                           | 175,5                                | 21,2                                |
| 1            | 180              | 887                                        | 5,15                                           | 326,9                                | 48,9                                |
| 1,5          | 198              | 867                                        | 7,60                                           | 406,7                                | 70,4                                |

Demgegenüber hat die Dichte des aufgelasteten Druckmediums (Luft, Stickstoff) folgende Werte:

| $p$<br>MPa | $t$<br>°C | $\rho_G$<br>kg/m <sup>3</sup> | $p$<br>MPa | $t$<br>°C | $\rho_G$<br>kg/m <sup>3</sup> |
|------------|-----------|-------------------------------|------------|-----------|-------------------------------|
| 0,4        | 20        | 4,71                          | 0,4        | 144       | 3,31                          |
| 1          | 20        | 11,77                         | 1          | 180       | 7,61                          |
| 1,5        | 20        | 17,65                         | 1,5        | 198       | 10,98                         |

### 1. Modell



Tritt im Behälter eine Separation von Dampf und Wasser auf, so sind

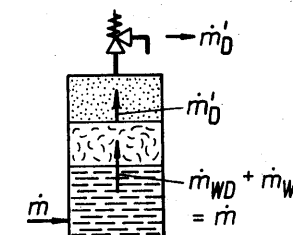
$$\dot{m}_{WD}$$

und der zu  $\dot{m}_W$  volumenäquivalente Druckmedienstrom

$$\dot{m}_D = \dot{m}_W \frac{\rho_D}{\rho_W}$$

abzuführen.

### 2. Modell



Erfolgt keine Separation des Dampf-Wasser-Gemisches, so schwimmt das Druckmedium infolge seiner geringeren Dichte auf diesem Gemisch und muß zuerst abgeführt werden. Es ergibt sich der Abblasestrom

$$\dot{m}'_D = \dot{m} \frac{\rho_D}{\rho_x} = \dot{m}_{WD} \frac{\rho_D}{\rho_{WD}} + \dot{m}_W \frac{\rho_D}{\rho_W}$$

### Vergleich der Modelle

In beiden Fällen ist der Anteil  $\dot{m}_D = \dot{m}_W \rho_D / \rho_W$  abzuführen. Somit bleibt nur noch zu überprüfen, welche Belastung  $\dot{m}_{WD}$  oder  $\dot{m}'_D$  den größten Sicherheitsventil-Querschnitt erfordert. Für Gasabströmung (Index G) gilt

$$A_0 = C \frac{\dot{m}_G}{\psi_G \sqrt{\rho_G}}$$

Für die beiden zu vergleichenden Stoffströme folgt das Querschnittsverhältnis zu

$$\frac{A_{0,WD}}{A_{0,D}} = \frac{\dot{m}_{WD}}{\psi_{WD} \sqrt{\rho_{WD}}} \frac{\rho_{WD} \psi_D \sqrt{\rho_D}}{\dot{m}_D \rho_D} = \frac{\psi_D}{\psi_{WD}} \sqrt{\frac{\rho_{WD}}{\rho_D}}$$

Das Einsetzen praxisnaher Werte liefert

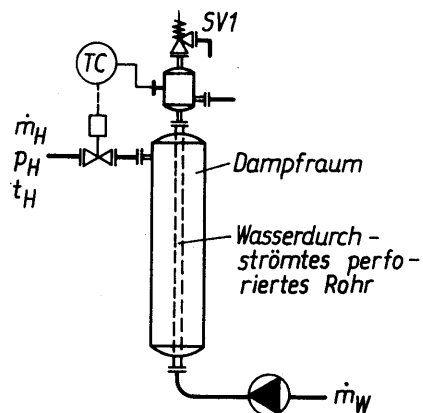
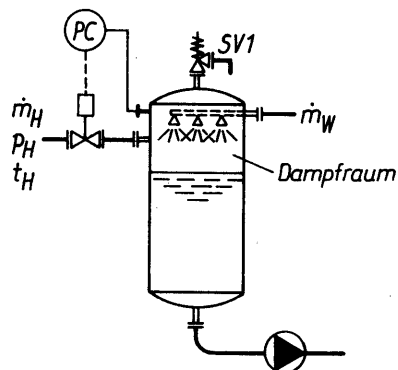
$$\frac{A_{0,WD}}{A_{0,D}} = \frac{0,484}{0,45} \left( \sqrt{\frac{2,16}{4,71}} \dots \sqrt{\frac{7,60}{17,65}} \right) = (0,73 \dots 0,71),$$

d.h., das 2. Modell stellt den ungünstigeren Lastfall dar.

Entsteht in einem Behälter mit Druckmedienauflastung (Luft, Stickstoff) durch Entspannung eines eintretenden Wasserstromes Naßdampf, so wird angenommen, daß während der I. Phase das Druckmedium und in der II. Phase der Naßdampf abzuführen ist.

### Lastannahme bei Dampfzufuhr in Mischvorwärmern

Die Arbeitsweise von konventionellen Mischvorwärmern und von modernen Strömungsmischvorwärmern basiert auf dem engen Kontakt von Heizdampf und Umlaufwasser mit dem Ergebnis der Dampfkondensation.



Versagt die Regelung der Dampfzufuhr, so muß der überschüssige Dampf über das an der höchsten Stelle installierte Sicherheitsventil SV1 abgeführt werden.

Dabei ist zu prüfen, ob das Ableiten der zugeführten Dampfmenge oder eine nach dem Kontakt mit dem zuströmenden Wasser entstandene größere Sattdampfmenge die maßgebliche Belastung für das Sicherheitsventil darstellt. Bei aktiviertem Sicherheitsventil entspricht der Druck im Mischvorwärmer  $p_M$  dem Ansprechdruck  $p_A$ . Nachfolgende Beispielrechnungen geben vergleichende Aussagen über die erforderlichen Sicherheitsventil-Querschnitte unter Beachtung der praktischen Gegebenheiten:

| Fall | Heizdampfparameter |             |                | Mischvorwärmer |                  |
|------|--------------------|-------------|----------------|----------------|------------------|
|      | $p_H$<br>MPa       | $t_H$<br>°C | $h_H$<br>kJ/kg | $p_M$<br>MPa   | $h_M''$<br>kJ/kg |
| 1    | 1,5                | 250         | 2 923          | 1,0            | 2 777            |
| 1*   | 1,5                | 198         | 2 790          | 1,0            | 2 777            |
| 2    | 1,0                | 230         | 2 898          | 0,8            | 2 768            |
| 2*   | 1,0                | 180         | 2 777          | 0,8            | 2 768            |
| 3    | 0,6                | 200         | 2 850          | 0,4            | 2 739            |
| 3*   | 0,6                | 159         | 2 756          | 0,4            | 2 739            |

Wird der Heizdampf direkt nach der Entspannung auf  $p_M$  abgeleitet, so erfordert dies den Sicherheitsventil-Querschnitt

$$A_0 = K \times \dot{m}_H,$$

wobei  $K$  eine Konstante,  $x$  der Druckmittelbeiwert nach Gl. (4.32) und  $\dot{m}_H$  der abzublasende Heizdampfstrom bedeuten. Für den späteren Vergleich ist nur der modifizierte Querschnitt

$$A_0' = \frac{A_0}{K \dot{m}_H} = x$$

erforderlich.

Reagiert der Heizdampf nach der Entspannung mit dem Wasser im Mischvorwärmer, so kann maximal der Sattdampfstrom

$$\dot{m}_M = \dot{m}_H \frac{h_H - h_W}{h_M'' - h_W}$$

entstehen. Der erforderliche Sicherheitsventil-Querschnitt

$$A_0 = K \times \dot{m}_M = K \times \dot{m}_H \frac{h_H - h_W}{h_M'' - h_W}$$

kann für den vorzunehmenden Vergleich ebenfalls in modifizierter Form

$$A_0'' = \frac{A_0}{K \dot{m}_H} = x \frac{h_H - h_W}{h_M'' - h_W}$$

geschrieben werden. Dabei stellt  $h_W$  die Enthalpie des in den Mischvorwärmer strömenden Wassers dar, und  $h_M''$  entspricht der zu  $p_M$  gehörigen Sattdampfenthalpie. Für die Wassertemperatur  $t_W = 70^\circ\text{C}$  ergibt sich  $h_W = 293 \text{ kJ/kg}$ .

Nachfolgend sind die näherungsweise ermittelten Querschnitte  $A_0'$  und  $A_0''$  gegenübergestellt ( $\alpha = 1,3$ ):

| Fall         | 1     | 1*    | 2     | 2*    | 3     | 3*    |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_0'$       | 1,99  | 1,85  | 1,96  | 1,83  | 1,91  | 1,81  |
| $A_0''$      | 1,94  | 1,84  | 1,92  | 1,83  | 1,87  | 1,80  |
| $A_0''/A_0'$ | 0,975 | 0,995 | 0,980 | 1,000 | 0,979 | 0,994 |

Diese Unterschiede liegen im Genauigkeitsbereich der üblichen technischen Annahmen. Als Lastannahme für das Sicherheitsventil werden vereinfachend der zugeführte Dampfmassestrom und die Dichte bei Entspannung auf Ansprechdruck zugrunde gelegt.

Weichen die Parameter stark von den überprüften Verhältnissen ab, so sind entsprechende Kontrollrechnungen durchzuführen.

Bei Strömungsmischvorwärmern ist für eine wirksame Separation von Dampf und Wasser vor dem Sicherheitsventil zu sorgen.

### Lastannahme bei Phasenwechsel des Behälterinhaltes durch Beheizung

Kommt in einem Dampf- bzw. Wasserkessel oder in einem Wärmeübertrager das Behälterinhaltswasser zum Verdampfen, so kann angenommen werden, daß sich an der höchsten Stelle trocken gesättigter Wasserdampf (Sattdampf) sammelt. Da der Verdampfungsvorgang an einer Heizfläche erfolgt und die Dampfblasen aufgrund des Auftriebs emporsteigen, werden in der Regel keine Wassertropfen mitgerissen, wie dies bei der Entspannung mit großer aufgeprägter Geschwindigkeit geschieht.

**Der entstandene Sattdampf ist durch das Sicherheitsventil SV1 abzuführen.**

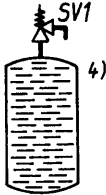
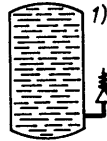
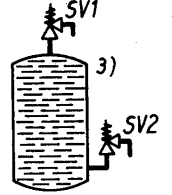
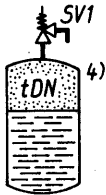
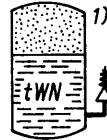
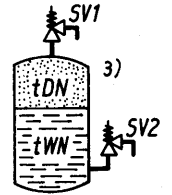
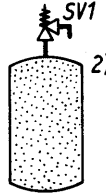
Die zusätzliche Anbringung eines wasserseitig angeordneten Sicherheitsventils SV2 ist unzulässig, da es durch Abspeisen von Wasser zu einer schnelleren Trockenlegung der Heizfläche führt und die Ausbrenngefahr vergrößert.

### Zusammenfassende Prämissen

Die bisherigen Ausführungen zeigen, daß jeder Belastungsfall, jede Behälterfüllung und jede Sicherheitsventilanordnung der speziellen Untersuchung bedürfen. Um allgemeingültig, aber dennoch praxisbezogen die Detailuntersuchungen vornehmen zu können, werden vorab nachfolgende **Prämissen** formuliert:

- I. Bei möglicher Dampf Bildung im abzusichernden Anlagenteil (Behälter, Rohrleitung) oder bei Vollfüllung des Anlagenteils mit einem kompressiblen Medium ist stets an der höchsten Stelle des Druckkörpers ein Sicherheitsventil SV1 ohne Entstehungsmöglichkeit einer Wasservorlage vorzusehen.  
Kommt es durch Beheizung des Wassers im Behälter zur Dampf Bildung (Kessel, Wärmeübertrager), so darf der Druckraum nur durch Variante 1 abgesichert werden.
- II. Bei Sicherheitsventil-Doppelanordnungen SV1 und SV2 am gleichen Anlagenteil werden die abzuleitenden kompressiblen Medienströme (Wasserdampf, Gas) stets dem an der höchsten Stelle des Druckkörpers angebrachten Sicherheitsventil SV1 und der Wasserstrom stets dem tieferliegenden Sicherheitsventil SV2 zugeordnet. Da keine allgemeingültigen Aussagen über die Separationswirkung der Behälter getroffen werden können, sei auch der bei Heißwasserentspannung entstehende Naßdampf als kompressibles, über SV1 abzublasendes Medium verstanden.
- III. Anlagenteile mit Dampf- oder Gasvöllfüllung müssen an der tiefsten Stelle eine Kondensatentwässerung erhalten.
- IV. Bei Sicherheitsventil-Doppelanordnung ist trotz der unter II. getroffenen Lastzuweisungen zu beachten, daß bei Variante 3 das zuerst ansprechende SV1 auch für Wasserabströmung zugelassen sein muß und dieses gefahrlos ableitet

**Tabelle 2.1** Kennzeichnungen für Lage und Anzahl der Sicherheitsventile sowie Art und Höhe der Behälterfüllung bei Normalbetrieb

| Variante                                                                            |                                                                                     |                                                                                     | Art des Druckmedienpolsters          | Stand der Wasserfüllung |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| V=1                                                                                 | V=2                                                                                 | V=3 oder V=4                                                                        |                                      |                         |
|  |  |  |                                      | W=1                     |
|  |  |  | DP=1<br>oder<br>DP=2<br>oder<br>DP=3 | W=0,5                   |
|  |                                                                                     |                                                                                     |                                      | W=0                     |

$t_{DN} \equiv t_{DN}$  bzw.  $t_{WN} \equiv t_{WN}$  Temperatur des Druckmediums bzw. des Wassers im Behälter bei normalem Betriebszustand

DP=1 (Luft oder Stickstoff); DP=2 (Sattdampf); DP=3 (Heißdampf)

- 1) Bei möglicher Dampf Bildung V=2 unzulässig
  - 2) An der tiefsten Stelle Kondensatentwässerung vorsehen
  - 3) Anordnung V=3 oder V=4 ist nur sinnvoll, wenn außer der Wassereinströmung auch eine Gas- bzw. Dampfzufuhr vorhanden ist oder sich durch Entspannung des eintretenden Wasserstromes Naßdampf bilden kann. Die Gas-, Dampf- bzw. Naßdampfströme werden SV1 und die Wasserströme SV2 zugewiesen. Diese Lastannahme ist jedoch nicht immer eindeutig.
  - 4) V=1 ist als einzige Variante zur Absicherung mittels Sicherheitsventils von Dampf- und Wasserkesseln sowie von Wärmeübertragern mit möglicher Dampf Bildung zulässig.
- Können die Sicherheitsventile nicht direkt am Behälter angeordnet werden, so ist auch ein Anschluß an den Zuleitungen (z.B. Vor- bzw. Rücklauf) möglich.

sowie daß umgekehrt bei Variante 4 das zuerst ansprechende SV2 auch mit Wasserdampf bzw. Gas beaufschlagt werden darf und dieses Fluid ebenfalls gefahrlos abführt.

Die aus den Prämissen I. bis III. folgenden zulässigen Lösungen sind in der Tabelle 2.1 zusammengestellt. Die Temperaturen und Kennzahlen entsprechen den im Unterprogramm verwendeten Bezeichnungen.

Bei den Varianten  $V = 3$  und  $V = 4$  kann es vorkommen, daß durch die unter II. getroffene Medienzuordnung und durch die vorgegebene Ansprechreihenfolge nicht immer die druckerhöhenden Medienströme zuerst abgeführt werden. Die theoretischen Lastzuordnungen treten in praxi dann nicht in voller Größe auf. Sie werden in den weiteren tabellarischen Zusammenstellungen mit "Lastzuordnung nicht eindeutig" gekennzeichnet.

### 2.1.2. Unterprogramm

Der einfache Algorithmus zur Berechnung der Ansprechdrücke ist im Bild 2.3 als Unterprogramm **PA** rechenstechnisch aufbereitet. Dabei besteht aber auch die Möglichkeit, die Abblasedrücke direkt vorzugeben. Eine Überprüfung der Gl. (2.3) und (2.4) erfolgt dann nicht. Die Kennzahlen SG und V steuern den Programmablauf.

Das Unterprogramm **PA** ist den später noch folgenden stets vorzuschalten. Deshalb sind hier einige Fundamenteingaben erforderlich:

- Variante der gewählten Sicherheitsventilanordnung
- Ansprechdrücke, wenn diese bereits determiniert sind
- Höhen der Sicherheitsventile über einer Bezugsebene
- Abfrage nach Vorhandensein eines Gas- oder Dampfpolsters
- Öffnungsdruckverhältnis der verwendeten Sicherheitsventile.

Liegen die Ansprechdrücke bereits fest (Steuergröße  $SG=1$ ), so werden diese als  $pA1$  bzw.  $pA2$  eingegeben. Ansonsten ( $SG=0$ ) sind sie nach Abschnitt 2.1.1. zu bestimmen. Dazu ist der zulässige Anlagendruck  $pAnl$  zu benennen.

Die Anbringungshöhen  $H1$  und  $H2$  der Sicherheitsventile sind stets notwendige Eingabewerte. Sie sind bei  $SG=0$  auf den tiefsten Punkt des Druckraumes zu beziehen. Bei vorgegebenen Ansprechdrücken ( $SG=1$ ) kann eine willkürliche Bezugsebene gewählt werden. Die Kenngrößen  $W$  und  $DP$  charakterisieren das Vorhandensein bzw. die Art des Druckmedienpolsters. Sie werden in späteren Unterprogrammen benötigt.

Bei zwei Sicherheitsventilen ( $V=3$ ;  $V=4$ ) ist noch das armaturespezifische Öffnungsdruckverhältnis  $\omega$  der verwendeten Sicherheitsventile einzugeben.

Wenn die Abblasedrücke bestimmt ( $SG=0$ ) bzw. Doppelanordnungen ( $V=3$ ;  $V=4$ ) bezüglich der Ansprechfolge beurteilt werden müssen, sind bei Wasservoll- oder Wasserteilfüllungen ( $W > 0$ ) die maximalen hydrostatischen Drücke zu berechnen. Sie ergeben sich bei minimaler Behältertemperatur  $tmin$ . Diese ist in den genannten Fällen ebenfalls einzugeben. Mit **RHOW** wird anschließend die zu  $tmin$  gehörige Dichte des Wassers ermittelt.

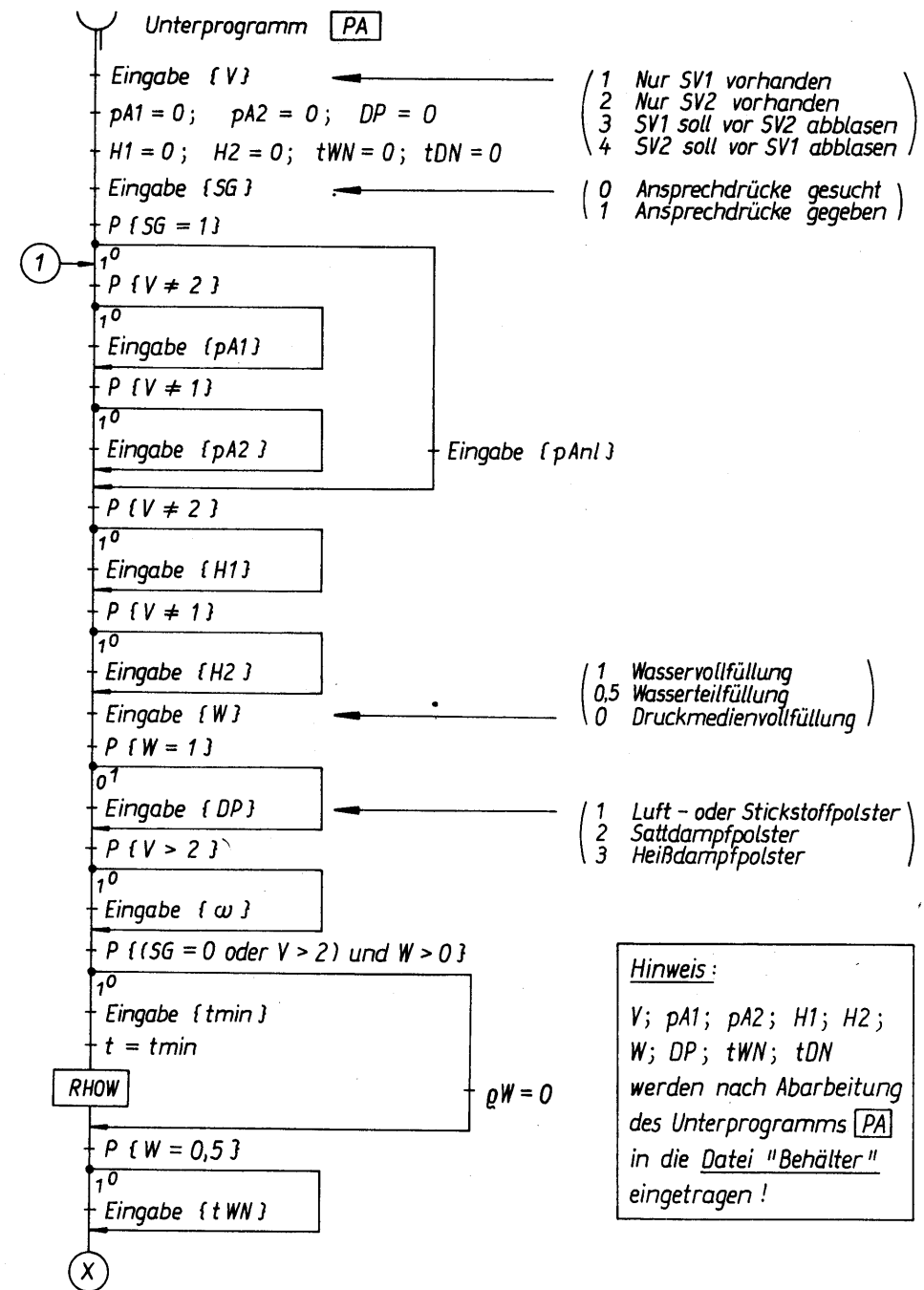


Bild 2.3 Flußplan des Unterprogramms **PA** (Ansprechdruck) zur Ermittlung der Ansprechdrücke von Sicherheitsventilen unter Bezugnahme auf Bild 2.1 und zur Durchführung von Fundamenteingaben mit dem Ergebnis: Füllen der Datei "Behälter"

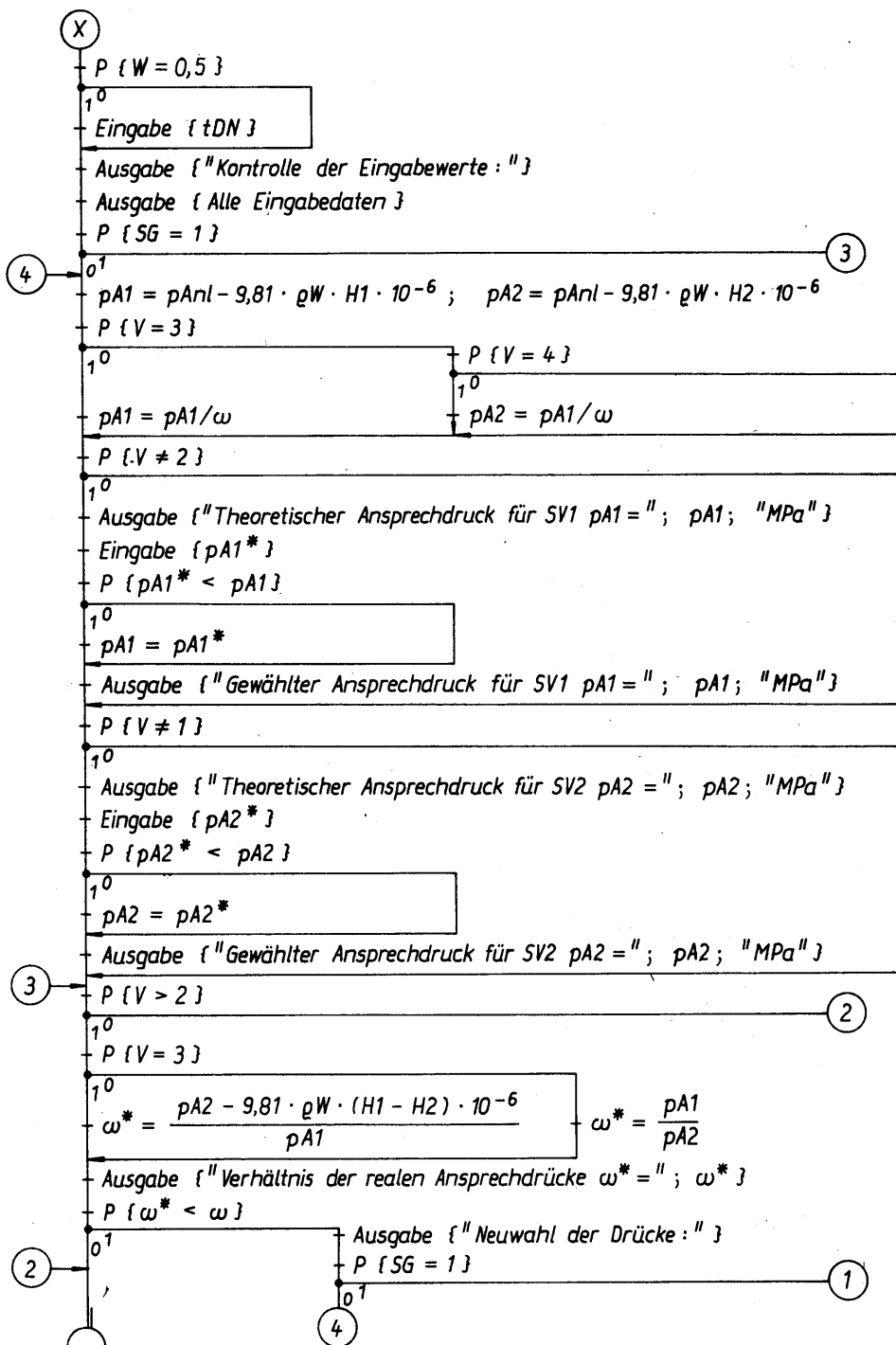


Bild 2.3(2)

Die Eingabe der Wassertemperatur  $t_{WN}$  und der Druckmedientemperatur  $t_{DN}$  für den normalen Betriebsfall werden in den späteren Unterprogrammen verwendet, um die entsprechenden Dichten für das Wasser sowie das Druckpolster zu ermitteln. Diese sind zur Auswertung der Gl. (2.5) und (2.6) erforderlich.

Nunmehr beginnt die eigentliche Berechnung der Ansprechdrücke. Bei  $SG=0$  folgt die Auswertung der Gl. (2.3) bzw. (2.4) und im Falle der Doppelanordnung die der Gl. (2.9) oder (2.10). Nach Angabe der errechneten Abblasedrücke  $pA1$  und  $pA2$  können gewählte Drücke  $pA1^*$  und  $pA2^*$  - beispielsweise ganzzahlige kPa-Werte - benannt werden. Sie finden Beachtung, wenn sie kleiner als die theoretischen Werte sind.

Für die Doppelanordnung wird noch das Verhältnis  $\omega^*$  der realen Ansprechdrücke unter Berücksichtigung der jeweils ungünstigsten Wasserstandsverhältnisse berechnet und ausgegeben. Gilt  $\omega^* < \omega$ , wird eine neue Festlegung der Ansprechdrücke abverlangt.

#### Eingabewerte (Bezugnahme auf Bild 2.1 und Tabelle 2.1)

|      |     |                                                                                                                                                                                                                                              |
|------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V    | -   | Absicherungsvariante                                                                                                                                                                                                                         |
| V=1  |     | Es ist nur ein Sicherheitsventil SV1 druckmedien-seitig angeordnet.                                                                                                                                                                          |
| V=2  |     | Es ist nur ein Sicherheitsventil SV2 wasserseitig angeordnet.                                                                                                                                                                                |
| V=3  |     | Es sind zwei Sicherheitsventile SV1 und SV2 angeordnet, wobei SV1 zuerst abblasen soll.                                                                                                                                                      |
| V=4  |     | Es sind zwei Sicherheitsventile SV1 und SV2 angeordnet, wobei SV2 zuerst abblasen soll.                                                                                                                                                      |
| SG   | -   | Steuergröße                                                                                                                                                                                                                                  |
| SG=0 |     | Die Ansprechdrücke sind zu bestimmen.                                                                                                                                                                                                        |
| SG=1 |     | Die Ansprechdrücke sind gegeben.                                                                                                                                                                                                             |
| pA1  | MPa | Gegebener Ansprechdruck (nur bei SG=1 und V≠2)                                                                                                                                                                                               |
| pA2  | MPa | Gegebener Ansprechdruck (nur bei SG=1 und V≠1)                                                                                                                                                                                               |
| pAnl | MPa | Zulässiger Anlagendruck (nur bei SG=0)<br>Er darf höchstens dem Berechnungsdruck entsprechen (Gl. (1.1)) und wird vom Projektanten unter Beachten von Regelungstoleranzen, Sicherheitszuschlägen sowie der eingesetzten Bauteile festgelegt. |
| H1   | m   | Höhe von SV1 (nur bei V≠2)                                                                                                                                                                                                                   |
| H2   | m   | Höhe von SV2 (nur bei V≠1)                                                                                                                                                                                                                   |
|      |     | Es sind die Höhen Mitte Ausblasstutzen der Sicherheitsventile SV1 und SV2 über dem tiefsten Punkt des abzusichernden Behälterdruckraumes bei SG=0 bzw. über einer beliebigen Bezugsebene bei SG=1 zu bilden.                                 |

|                  |     |                                                                                                                                                                |
|------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| W                | -   | Behälterfüllung<br>W=1 Wasservollfüllung<br>W=0,5 Wasserteilfüllung<br>W=0 Druckmedienvollfüllung                                                              |
| DP               | -   | Art des Druckmediums<br>DP=1 Luft oder Stickstoff<br>DP=2 Sattedampf<br>DP=3 Heißdampf                                                                         |
| w                | -   | Öffnungsdruckverhältnis nach Gl. (2.7)<br>(nur bei $V > 2$ )                                                                                                   |
| t <sub>min</sub> | °C  | Minimale Wassertemperatur im Behälter (nur bei SG=0 oder $V > 2$ ) und ( $W > 0$ ))                                                                            |
| t <sub>WN</sub>  | °C  | Wassertemperatur im Behälter bei Normalbetrieb<br>(nur bei $W = 0,5$ )                                                                                         |
| t <sub>DN</sub>  | °C  | Druckmediumentemperatur im Behälter bei Normalbetrieb<br>(nur bei $W = 0,5$ )                                                                                  |
| pA1*             | MPa | Gewählter Ansprechdruck für SV1                                                                                                                                |
| pA2*             | MPa | Gewählter Ansprechdruck für SV2<br>Die Eingabe erfolgt nach Ausgabe der theoretisch ermittelten Größen pA1 und pA2. Es werden nur niedrigere Werte akzeptiert. |

### Eingabebeispiele für Sonderfälle

#### A. Volle Füllung mit Wasser

Dieser Fall trifft beispielsweise für Wärmeübertrager (Wasser/Wasser; Dampf/Wasser) und Wasserleitungen aller Art zu.

Ist bei Wärmeübertragern im Havariefall mit **Dampfbildung** zu rechnen, so muß das **Sicherheitsventil** stets an der **höchsten Stelle** angeordnet werden. Ansonsten ist die Anbindung beliebig.

Es gibt folgende Eingabemöglichkeiten:

| Version a                                                                                   | Version b                                                                                   | Version c                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V = \begin{array}{c c} 1 & \\ \hline 0 & 1 \\ \hline pA1 & pA1 \\ \hline H1 & \end{array}$ | $V = \begin{array}{c c} 2 & \\ \hline 0 & 1 \\ \hline pA1 & pA2 \\ \hline H2 & \end{array}$ | $V = \begin{array}{c c} 3;4 & \\ \hline 0 & 1 \\ \hline pA1 & pA1 \\ \hline H1 & pA2 \\ \hline H2 & \end{array}$ |
| $W = \begin{array}{c c} 1 & \\ \hline tmin & - \\ \hline pA1* & - \end{array}$              | $W = \begin{array}{c c} 1 & \\ \hline tmin & - \\ \hline pA2* & - \end{array}$              | $W = \begin{array}{c c} 1 & \\ \hline w & \\ \hline tmin & \\ \hline pA1* & - \\ \hline pA2* & - \end{array}$    |

#### B. Volle Füllung mit kompressiblem Medium

Beispiele hierfür sind Druckluftbehälter und Druckluft- bzw. Dampfnetze nach Reduziereinrichtungen, die gegen Drucküberschreitungen abzusichern sind. Das **Sicherheitsventil** muß stets an der **höchsten Stelle** angeordnet sein, um eine aus Kondensat gebildete Wasservorlage auszuschließen. Folgende Eingabe ist möglich:

|      |         |
|------|---------|
| V =  | 1       |
| SG = | 0 1     |
|      | pA1 pA1 |
|      | H1      |
| W =  | 0       |
| DP = | 1;2;3   |
|      | pA1*    |

#### Datei "Behälter"

Die wichtigsten Eingabewerte und Ergebnisse werden in der Datei "Behälter" gespeichert:

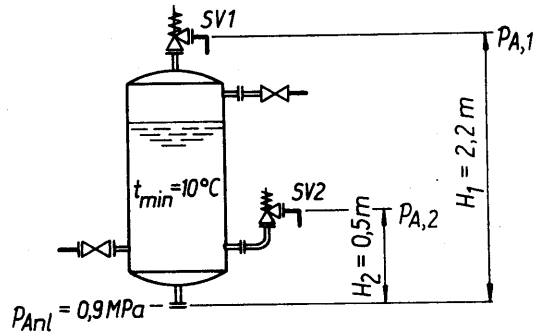
| V | pA1 | pA2 | H1 | H2 | W | DP | t <sub>WN</sub> | t <sub>DN</sub> |
|---|-----|-----|----|----|---|----|-----------------|-----------------|
|   |     |     |    |    |   |    |                 |                 |

Die Datei wird später um die Gegendrucke pG1 und pG2 ergänzt.

### 2.1.3. Beispiel

An einem Behälter können zwei Sicherheitsventile SV1 und SV2 installiert werden. Die höhenmäßige Lage der Ventile, der maximale Anlagendruck und die minimale Wassertemperatur sind im Bild 2.4 vermerkt.

Für alle möglichen Absicherungsvarianten (V=1 ... 4) sollen unter Annahme des Öffnungsdruckverhältnisses  $\omega = 1,1$  die Ansprechdrücke der Sicherheitsventile ermittelt werden.



**Bild 2.4** Geometrische und hydrostatische Gegebenheiten des im Beispiel 2.1.3. betrachteten Druckbehälters

#### Lösung

Die Dichte des Wassers beträgt bei 10 °C:  $\rho_W = 1000 \text{ kg/m}^3$ . Damit liefern die Gln. (2.3) und (2.4) die Ansprechdrücke

$$p_{A,1} \leq (0,9 - 9,81 \cdot 1000 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}) \text{ MPa} = 0,8784 \text{ MPa}$$

$$p_{A,2} \leq (0,9 - 9,81 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}) \text{ MPa} = 0,8951 \text{ MPa}$$

Diese Maximalwerte gelten für Einzelanordnungen von SV1 (Variante 1) und SV2 (Variante 2). Es werden gewählt:

$$p_{A,1} = p_{A,2} = 0,850 \text{ MPa}$$

Bei Variante 3 (SV1 bläst zuerst ab) folgt unter Beibehalten von

$$p_{A,2} = 0,850 \text{ MPa}$$

nach Gl. (2.9)

$$p_{A,1} < \frac{0,850 - 9,81 \cdot 1000 \cdot (2,2 - 0,5) \cdot 10^{-6}}{1,1} \text{ MPa} = 0,7576 \text{ MPa}$$

Es wird

$$p_{A,1} = 0,750 \text{ MPa}$$

gewählt.

Für Variante 4 (SV2 bläst zuerst ab) errechnet sich mit

$$p_{A,1} = 0,878 \text{ MPa}$$

nach Gl. (2.10)

$$p_{A,2} < \frac{0,878}{1,1} \text{ MPa} = 0,7982 \text{ MPa}$$

Gewählter Wert:

$$p_{A,2} = 0,798 \text{ MPa}$$

Das nach dem Flußplan 2.3 erstellte Programm liefert die nachfolgenden Protokolle.

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      |        | Festlegung der Ansprechdrücke |
|------------------------------------------|--------|-------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>       |        |                               |
| Absicherungsvariante                     | V =    | 1                             |
| Steuergröße                              | SG =   | 0                             |
| Zulässiger Anlagendruck                  | pAn1 = | 0.9000 MPa                    |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1          | H1 =   | 2.200 m                       |
| Behälterfüllung                          | W =    | 0.5                           |
| Art des Druckmediums                     | DP =   | 1                             |
| Minimale Wassertemperatur                | tmin = | 10 °C                         |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb |        |                               |
| Wasser                                   | tWN =  | 20 °C                         |
| Druckmedium                              | tDN =  | 20 °C                         |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                       |        |                               |
| Theoretischer Ansprechdruck für SV1      | pA1 =  | 0.8784 MPa                    |
| Gewählter Ansprechdruck für SV1          | pA1 =  | 0.8500 MPa                    |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      |        | Festlegung der Ansprechdrücke |
|------------------------------------------|--------|-------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>       |        |                               |
| Absicherungsvariante                     | V =    | 2                             |
| Steuergröße                              | SG =   | 0                             |
| Zulässiger Anlagendruck                  | pAn1 = | 0.9000 MPa                    |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2          | H2 =   | 0.500 m                       |
| Behälterfüllung                          | W =    | 0.5                           |
| Art des Druckmediums                     | DP =   | 1                             |
| Minimale Wassertemperatur                | tmin = | 10 °C                         |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb |        |                               |
| Wasser                                   | tWN =  | 20 °C                         |
| Druckmedium                              | tDN =  | 20 °C                         |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                       |        |                               |
| Theoretischer Ansprechdruck für SV2      | pA2 =  | 0.8951 MPa                    |
| Gewählter Ansprechdruck für SV2          | pA2 =  | 0.8500 MPa                    |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E |        | Festlegung der Ansprechdrücke |
|-------------------------------------|--------|-------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>  |        |                               |
| Absicherungsvariante                | V =    | 3                             |
| Steuergröße                         | SG =   | 0                             |
| Zulässiger Anlagendruck             | pAn1 = | 0.9000 MPa                    |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1     | H1 =   | 2.200 m                       |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2     | H2 =   | 0.500 m                       |
| Behälterfüllung                     | W =    | 0.5                           |

|                                          |                  |
|------------------------------------------|------------------|
| Art des Druckmediums                     | DP = 1           |
| Öffnungsverhältnis                       | Omega = 1.10     |
| Minimale Wassertemperatur                | tmin = 10 °C     |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb |                  |
| Wasser                                   | tWN = 20 °C      |
| Druckmedium                              | tDN = 20 °C      |
| ERGEBNISSE:                              |                  |
| Theoretischer Ansprechdruck für SV1      | pA1 = 0.7986 MPa |
| Gewählter Ansprechdruck für SV1          | pA1 = 0.7500 MPa |
| Theoretischer Ansprechdruck für SV2      | pA2 = 0.8951 MPa |
| Gewählter Ansprechdruck für SV2          | pA2 = 0.8500 MPa |
| Verhältnis der Ansprechdrücke            | Omega* = 1.11    |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E Festlegung der Ansprechdrücke |                   |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------|
| KONTROLLE DER EINGABEWERTE:                                       |                   |
| Absicherungsvariante                                              | V = 4             |
| Steuergröße                                                       | SG = 0            |
| Zulässiger Anlagendruck                                           | pAn1 = 0.9000 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                   | H1 = 2.200 m      |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2                                   | H2 = 0.500 m      |
| Behälterfüllung                                                   | W = 0.5           |
| Art des Druckmediums                                              | DP = 1            |
| Öffnungsverhältnis                                                | Omega = 1.10      |
| Minimale Wassertemperatur                                         | tmin = 10 °C      |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb                          |                   |
| Wasser                                                            | tWN = 20 °C       |
| Druckmedium                                                       | tDN = 20 °C       |
| ERGEBNISSE:                                                       |                   |
| Theoretischer Ansprechdruck für SV1                               | pA1 = 0.8784 MPa  |
| Gewählter Ansprechdruck für SV1                                   | pA1 = 0.8780 MPa  |
| Theoretischer Ansprechdruck für SV2                               | pA2 = 0.7986 MPa  |
| Gewählter Ansprechdruck für SV2                                   | pA2 = 0.7980 MPa  |
| Verhältnis der Ansprechdrücke                                     | Omega* = 1.10     |

## 2.2. Zuströmung von Wasser durch Pumpenförderung

Wird der Ausfluß des im Bild 2.5 dargestellten Behälters durch die Ventile V1 und V2 verschlossen, die Pumpe P aber weiterhin betrieben, so steigt bei Versagen des Druckregelkreises (PC) oder bei Nichtvorhandensein eines solchen der Druck entsprechend der Pumpenkennlinie an.

Index des Lastfalles: P

Charakteristische Eingangsgrößen:

- $p_p$  Druck am Pumpensaugstutzen
- $H_p$  Höhe des Pumpensaugstutzens
- $t_p$  Temperatur am Pumpensaugstutzen.

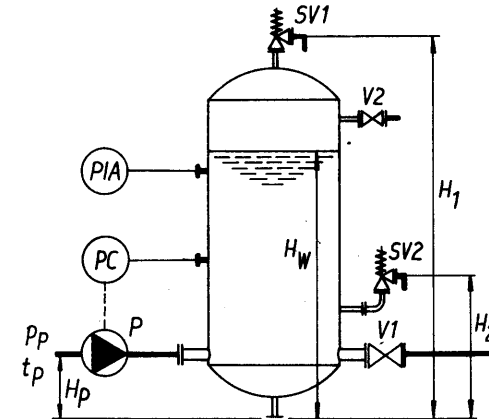


Bild 2.5 Zuströmung von Wasser im Havariefall durch unkontrollierte Pumpenförderung

### 2.2.1. Algorithmus

Zwischen der üblicherweise angegebenen Pumpenförderhöhe  $H_F(\dot{V})$  und dem Förderdruck  $\Delta p_F(\dot{V})$  besteht der Zusammenhang

$$H_F(\dot{V}) = \frac{\Delta p_F(\dot{V})}{g \rho_W} \quad (2.12)$$

Für den Saugdruck ist stets der maximal mögliche Wert einzusetzen. Im Bild 2.6 sind verschiedene Zulaufvarianten dargestellt. Hinweise zur Berechnung von  $p_p$  werden direkt im Bild gegeben.

Bei aktivierten Sicherheitsventilen ist der Gegendruck am Pumpendruckstutzen  $\bar{p}_G$  durch die Ansprechdrücke der Sicherheitsventile  $p_{A,1}$  bzw.  $p_{A,2}$  und die Höhe des Wasserstandes im Behälter variantenabhängig festgelegt. Somit gilt im Ansprechfall eines der Sicherheitsventile die Druckbilanz

$$p_p + \Delta p_F(\dot{V}) = \bar{p}_G \quad (2.13)$$

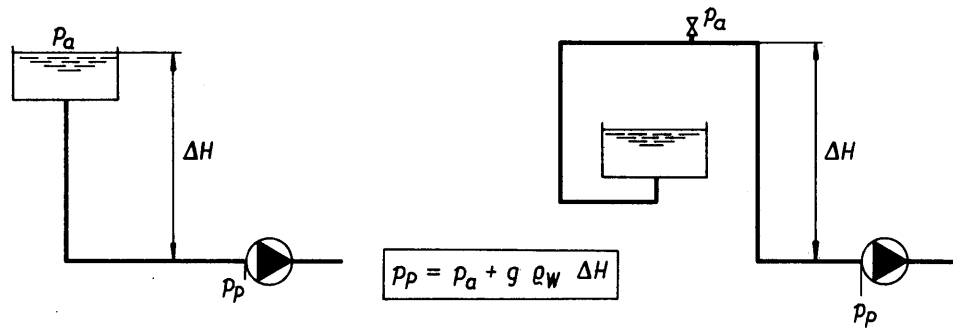
Die Substitution der Gl. (2.12) ergibt die notwendige Pumpenförderhöhe  $H_F^*$

$$H_F^* = \frac{\bar{p}_G - p_p}{g \rho_W} \quad (2.14)$$

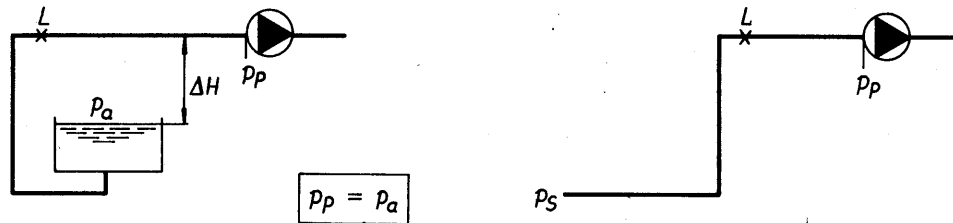
die das Ansprechen eines Sicherheitsventils bewirkt.

Das Eintragen von  $H_F^*$  in das Kennfeld der speziellen Pumpe (Bild 2.7) liefert im Fall 1 einen Schnittpunkt S und zugehörig den Förderstrom  $\dot{V}_S$ . Diesen Volumenstrom muß das Sicherheitsventil SV ableiten, wenn eine weitere Drucksteigerung vermieden werden soll.

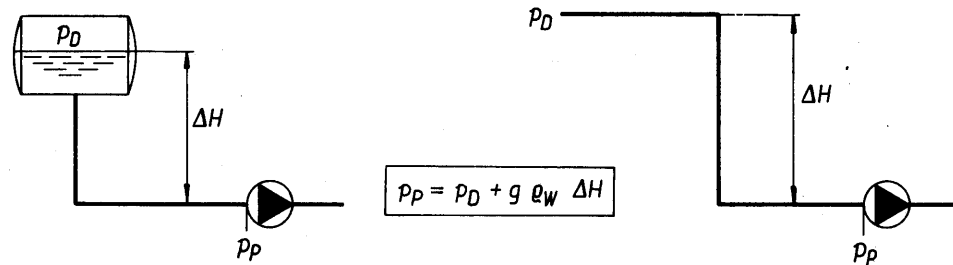
## A. Offener Hochbehälter oder belüftbarer Rohrleitungshochpunkt



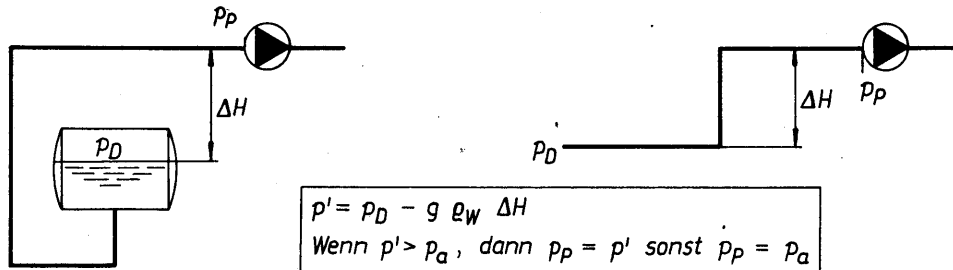
## B. Offener tiefliegender Behälter oder tiefliegende Saugleitung



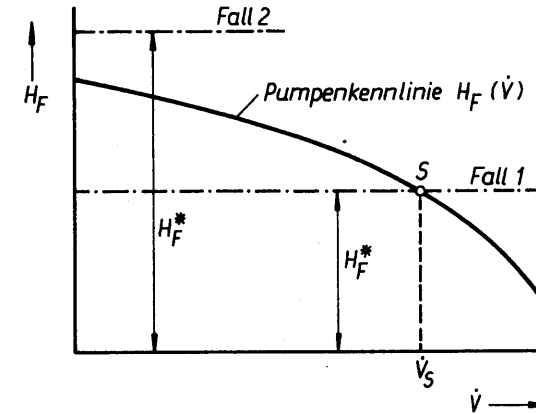
## C. Geschlossener, hochliegender Druckbehälter oder hochliegende Druckleitung



## D. Geschlossener, tiefliegender Druckbehälter oder tiefliegende Druckleitung



**Bild 2.6** Hinweise zur Ermittlung des Druckes am Pumpensaugstutzen  $p_p$  in Abhängigkeit der hydrostatischen Gegebenheiten (Atmosphärendruck  $p_a$ ; Auflastdruck  $p_D > p_a$ ; Saugdruck  $p_S < p_a$ ; L angenommene Leckstelle)



**Bild 2.7** Pumpenkennlinie (Förderhöhe  $H_F$  in Abhängigkeit des Volumenstroms  $\dot{V}$ ) und aufgeprägte Förderhöhe  $H_F^*$  beim Ansprechen des Sicherheitsventils

Im Fall 2 wird durch den Pumpenlauf das Sicherheitsventil nicht ansprechen, da selbst die maximale Druckerhöhung in der Pumpe - sie tritt beim Förderstrom  $\dot{V} = 0$  auf - nicht den Wert  $H_F^*$  erreicht.

Die Umrechnung des Volumenstromes in den Massestrom lautet für Wasser

$$\dot{m}_W = \dot{V}_S \rho_W \quad (2.15)$$

Die Dichte  $\rho_W$  ist in allen Fällen für die Temperatur des zuströmenden Wassers  $t_p$  zu bilden.

Der in Gl. (2.14) verwendete Gegendruck bedarf der variantenabhängigen Betrachtung.

Variante 1

Bei Ansprechdruck  $p_{A,1}$  und Wasservollfüllung bis zur Höhe  $H_1$  gilt

$$\bar{p}_G = p_{A,1} + g \rho_W (H_1 - H_p) \quad (2.16)$$

Damit ist  $H_F^*$  über Gl. (2.14) oder direkt

$$H_F^* = \frac{p_{A,1} - p_p}{g \rho_W} + (H_1 - H_p) \quad (2.17)$$

berechenbar. Der Abblasemassestrom folgt aus dem Volumenstrom  $\dot{V}_{S,1}$  zu

$$\dot{m}_{W,1} = \dot{V}_{S,1} \rho_W \quad (2.18)$$

Bei **Wasserteilfüllung** bis zur Höhe  $H_W$  muß zuerst das Druckmedium abgeblasen werden. Der größte Volumenstrom  $\dot{V}_{S,1}$  tritt beim tiefsten Wasserstand  $H_p$  auf, da dann

$$H_F^* = \frac{p_{A,1} - p_p}{g \rho_W} \quad (2.19)$$

gilt. Der abzublasende Massestrom berechnet sich zu

$$\dot{m}_{D,1} = \dot{V}_{S,1} \rho_{DN} \quad (2.20)$$

mit der Dichte  $\rho_{DN}$  des Druckmediums. Sie folgt je nach Art des Druckmediums aus den Gln. (A2) bis (A5) des Anhangs oder aus entsprechenden Diagrammen bzw. Tabellen. Die Dichte  $\rho_{DN}$  ist vom Abblasedruck  $p_{A,1}$  und von der Behältertemperatur  $t_{DN}$  abhängig.

### Variante 2

Analog zu Variante 1 gelten:

$$\bar{p}_G = p_{A,2} + g \rho_W (H_2 - H_P) \quad (2.21)$$

$$H_F^* = \frac{p_{A,2} - p_P}{g \rho_W} + (H_2 - H_P) \quad (2.22)$$

$$\dot{m}_{W,2} = \dot{V}_{S,2} \rho_W \quad (2.23)$$

### Variante 3

Bei dieser Variante tritt das Sicherheitsventil SV1 zuerst in Aktion, d.h., es bläst bei **Wasservollfüllung** auch einen Teil des Wasserstromes ab. Gemäß Lastzuweisung (Abschnitt 2.1.1. - Prämissen -) wird dieser aber nicht von der für SV2 angenommenen Belastung abgesetzt. Damit gelten als Lastannahme für SV2 in vollem Umfang die Berechnungsgleichungen für Variante 2 (Gln. (2.21) bis (2.23)).

Bei **Wasserteilfüllung** ist aufgabengemäß zuerst das Druckmedium ohne weitere Drucksteigerung abzuführen. Die Belastung des Sicherheitsventils SV1 folgt aus den Gln. (2.19) und (2.20).

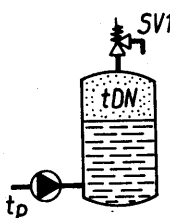
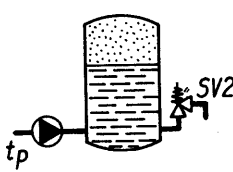
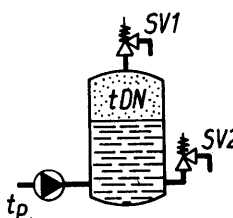
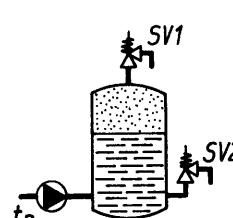
### Variante 4

Da das Wasser aus dem Druckbehälter zuerst über SV2 abgeleitet werden muß und nur der Wasserzufluß einen Druckanstieg bewirken kann, ist die Lastannahme für SV2 völlig mit Variante 2 identisch. Damit gelten die Gln. (2.21) bis (2.23) uneingeschränkt.

### Zusammenfassung

Die möglichen Lastkombinationen sind variantenabhängig in Tabelle 2.2 aufgeführt. Die Indizierung stimmt mit der Darstellung im nachfolgenden Unterprogramm überein. Eine Nachverdampfung des einströmenden Wassers im Behälter wird ausgeschlossen, da in der Pumpenausleitung vom flüssigen Aggregatzustand auszugehen ist und die Pumpe den Druck der Flüssigkeit auf das Behälterniveau erhöht.

Tabelle 2.2 Lastannahmen bei Pumpenförderung (P)

| Schaltung / Variante                                                                             | Phase | Abblasestrom    | Dichte                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------|-------------------------------------------|
| <br>$V = 1$   | I 1)  | $\dot{m}_{D1P}$ | $\rho_{D1P} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ |
|                                                                                                  | II    | $\dot{m}_{W1P}$ | $\rho_{W1P} = \rho_W(t_P)$                |
| <br>$V = 2$   |       | $\dot{m}_{W2P}$ | $\rho_{W2P} = \rho_W(t_P)$                |
| <br>$V = 3$  | I 1)  | $\dot{m}_{D1P}$ | $\rho_{D1P} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ |
|                                                                                                  | II 2) | $\dot{m}_{W2P}$ | $\rho_{W2P} = \rho_W(t_P)$                |
| <br>$V = 4$ |       | $\dot{m}_{W2P}$ | $\rho_{W2P} = \rho_W(t_P)$                |

1) Bei  $W=1$  entfällt Phase I.

2) Lastannahme nicht eindeutig

### 2.2.2. Unterprogramm

Um den beschriebenen Algorithmus durchgängig automatisiert abarbeiten zu können, ist die **Pumpenkennlinie** in Gleichungsform zu approximieren. Nach /6/ liefert ein Polynom dritten Grades

$$H_F(\dot{V}) = a_p + b_p \dot{V} + c_p \dot{V}^2 + d_p \dot{V}^3 \quad (2.24)$$

in der Regel ausreichende Genauigkeit. Es gelten:

|                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| $H_F$                | Pumpenförderhöhe  |
| $\dot{V}$            | Pumpenförderstrom |
| $a_p, b_p, c_p, d_p$ | Koeffizienten.    |

Wird zur automatisierten Projektierung ein Pumpenkatalog verwendet, so ist dieser zu integrieren. Aus diesem Grund sei auch auf Gl. (2.24) Bezug genommen, obwohl die inverse Darstellung  $\dot{V} = f(\Delta p_F)$  im vorliegenden Fall bedeutend geeigneter wäre.

Weiterhin sind die im Bild 2.6 anschaulich dargestellten Konstellationen zur Berechnung des Druckes am Pumpenansaugstutzen bezüglich der Eingabedaten zu vereinheitlichen und ein selbständig arbeitender Entscheidungsalgorithmus zu konzipieren. Gemäß Bild 2.8 werden der definierte Druck  $p_{RP}$  in der Saugleitung und der zugehörige, vorzeichenbehaftete Höhenunterschied  $H_{RP}$  eingeführt.

Nachfolgende Schritte charakterisieren den Grobalgorithmus:

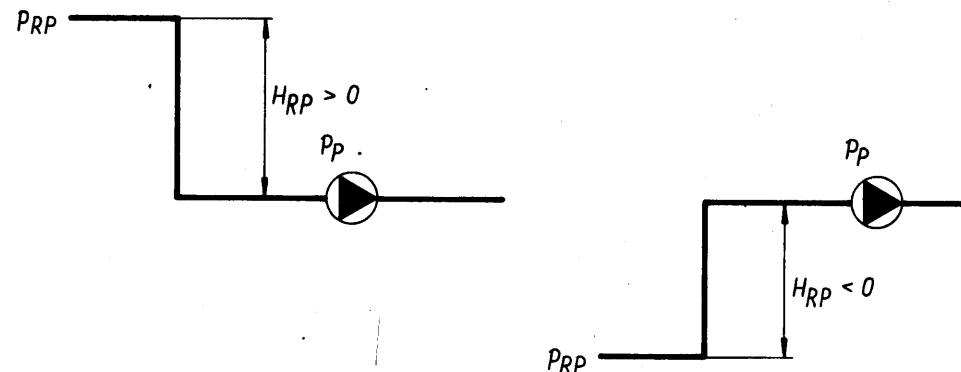
- Wenn  $p_{RP} > p_a$ , dann  $p_p = p_{RP} + g \cdot \rho_w \cdot H_{RP}$   
sonst  $p_p = p_a + g \cdot \rho_w \cdot H_{RP}$ .
- Wenn  $p_p < p_a$ , dann  $p_p = p_a$ .

Die im Bild 2.6 dargestellten Fälle seien stichpunktartig überprüft:

- A.:  $p_{RP} = p_a$ ;  $H_{RP} = \Delta H \rightarrow p_p = p_a + g \cdot \rho_w \cdot \Delta H$   
 B.:  $p_{RP} = p_a$ ;  $H_{RP} = -\Delta H \rightarrow p_p = p_a$   
 C.:  $p_{RP} = p_D$ ;  $H_{RP} = \Delta H \rightarrow p_p = p_D + g \cdot \rho_w \cdot \Delta H$   
 D.:  $p_{RP} = p_D$ ;  $H_{RP} = -\Delta H \rightarrow p_p = p_D - g \cdot \rho_w \cdot \Delta H \geq p_a$   
 oder  
 $p_p = p_a$ .

Wie gezeigt, besteht Übereinstimmung.

Im Bild 2.9 ist der komplette Datenflußplan zur Ermittlung der Abblaseströme im Havariefall der unkontrollierten Pumpenförderung als Unterprogramm **ABS - P** angegeben. Die Abarbeitung setzt voraus, daß vorher die Ansprechdrücke mit dem Unterprogramm **PA** ermittelt wurden und alle relevanten Daten verfügbar sind.

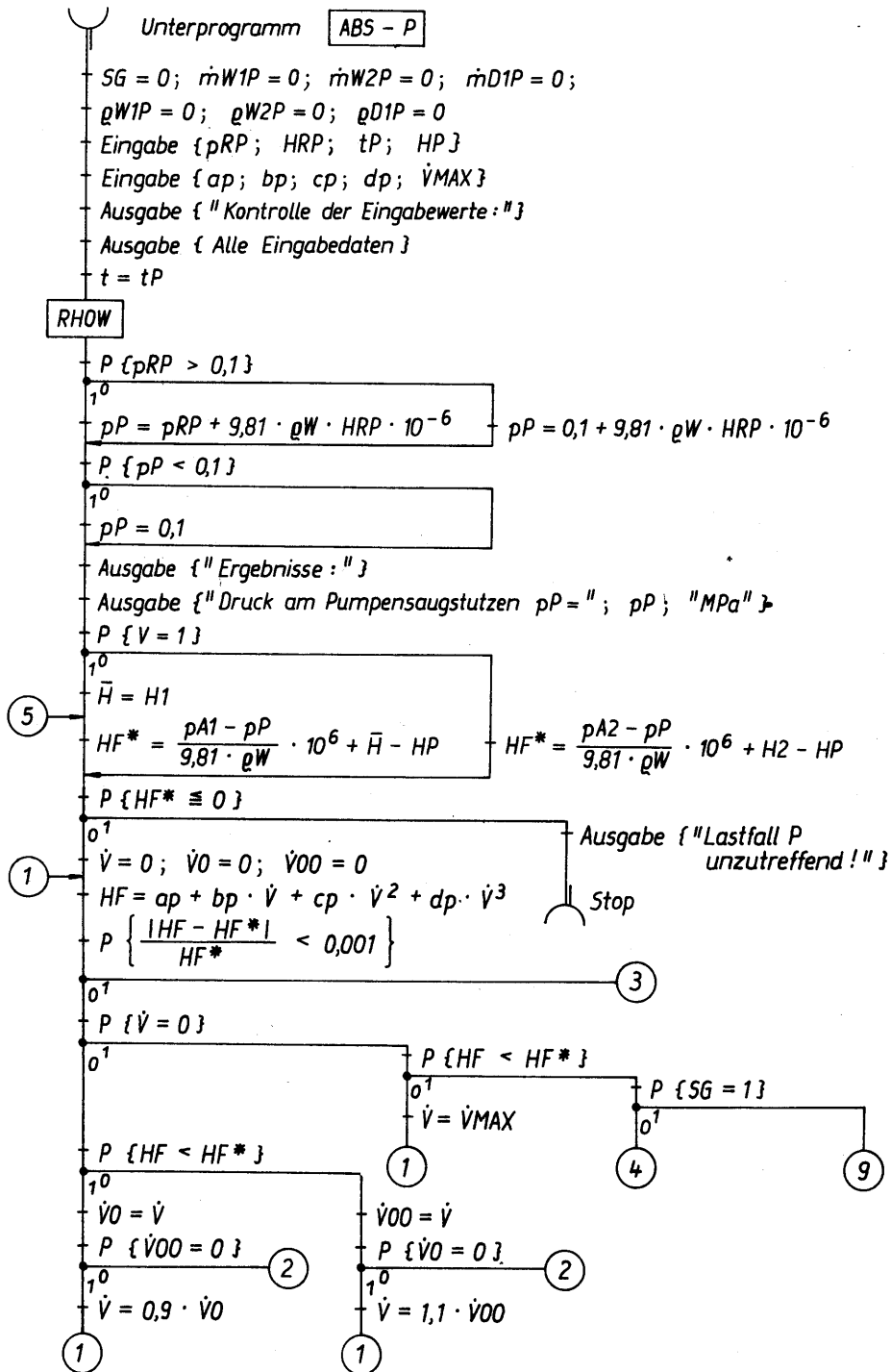


**Bild 2.8** Hydrostatische Gegebenheiten zur automatisierten Ermittlung des Druckes am Pumpenansaugstutzen  $p_p$

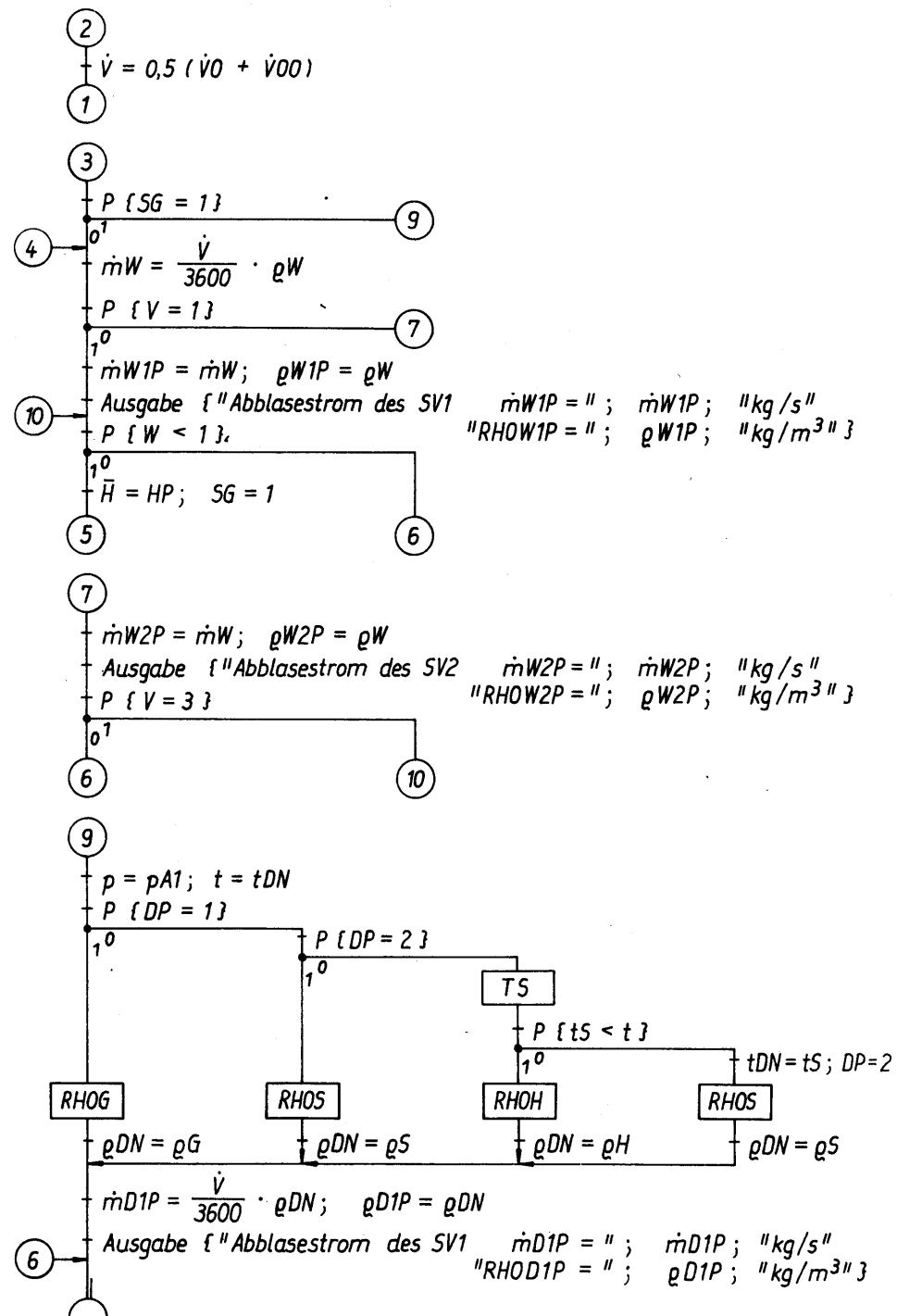
Steuerfunktionen übernehmen die Variantenkennzahl  $V$ , die Druckmediencharakteristik  $DP$  und der Wasserfüllstand  $W$ .

Der Abgleich von  $H_F(\dot{V})$  mit  $H_F^*$  muß iterativ erfolgen. Vorab wird mit  $\dot{V} = 0$  geprüft, ob überhaupt ein Schnittpunkt existiert. Wenn ja, so gilt als Ausgangswert  $\dot{V} = \dot{V}_{MAX}$ , der Volumenstrom der rechtsseitigen Kennlinienbegrenzung. Sie dient nur zur Orientierung, da diese im Havariefall natürlich überfahren werden kann. Der Wert  $\dot{V}$  wird systematisch erhöht, wenn  $H_F > H_F^*$  gilt. Bei nicht erfüllter Ungleichung erfolgt die schrittweise Verringerung von  $\dot{V}$ . Nachdem erstmalig Volumenströme beiderseitig des Schnittpunktes  $H_F = H_F^*$  mit  $\dot{V}_0$  und  $\dot{V}_{00}$  vorliegen, wird der jeweils nächste Iterationswert durch das arithmetische Mittel gebildet  $\dot{V} = 0,5 (\dot{V}_0 + \dot{V}_{00})$ . Nach Unterschreiten der vorgegebenen Fehlerschranke erfolgt die Umrechnung auf den Massestrom  $\dot{m}_W$  mittels Gl. (2.15). Dieser wird bei Variante 1 als  $\dot{m}_{W1P}$  und bei den übrigen Varianten als  $\dot{m}_{W2P}$  ausgewiesen.

Ist ein Druckmedium aufgelastet, so berechnet sich für  $V = 1$  und  $V = 3$  der abzublasende Massestrom  $\dot{m}_{D1P}$  nach Gl. (2.20). Die Dichte  $\rho_{DN}$  ergibt sich bei Gasauflastung aus **RHOG**, bei Sattedampfbeaufschlagung aus **RHOS** und im Sonderfall eines Heißdampfpolsters aus **RHOH** (Gln. (A2) bis (A5)). Ein stetiges Heißdampfpolster wird in der Praxis kaum vorkommen, deshalb erfolgt vor der Dichteermittlung noch eine Testrechnung. Dabei wird die zum Druck  $p = p_{A1}$  gehörige Siedetemperatur  $t_S$  mit **TS** bestimmt und anschließend mit der Eingabetemperatur  $t_{DN}$  verglichen. Für  $t_S < t_{DN}$  existiert tatsächlich eine Heißdampfbeaufschlagung ( $\rho_{DN} = \rho_H$ ). Wenn  $t_S \geq t_{DN}$  gilt, wird die Eingabeunstimmigkeit ( $DP = 3$ ) mit der realeren Variante "Sattedampfpolster" egalisiert ( $\rho_D = \rho_S$ ). Ein Kommentar erfolgt nicht.



**Bild 2.9** Flußplan des Unterprogramms **ABS-P** (Abblasestrom - Pumpenzufluß) zur Ermittlung der Abblaseströme infolge unkontrollierter Pumpenförderung



**Bild 2.9(2)**

**Eingabewerte** (Bezugnahme auf die Bilder 2.5 und 2.8 sowie Tabelle 2.2)

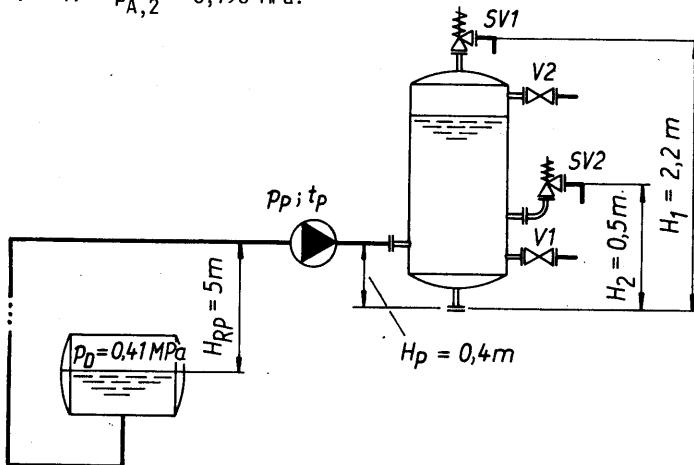
|                 |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pRP             | MPa                                                                                                                 | Bekannter hydrostatischer Druck an einem signifikanten Punkt der saugseitigen Rohrleitung                                                                                                      |
| HRP             | m                                                                                                                   | Vorzeichenbehaftete Höhe dieses Punktes, bezogen auf den Pumpensaugstutzen                                                                                                                     |
| tP              | °C                                                                                                                  | Temperatur des zuströmenden Wassers                                                                                                                                                            |
| HP              | m                                                                                                                   | Lage des Saugstutzens über dem tiefsten Punkt des Behälterdruckraumes oder der gewählten Bezugsebene                                                                                           |
| ap              | $H_F = a_p + b_p \cdot \dot{V} + c_p \cdot \dot{V}^2 + d_p \cdot \dot{V}^3$ mit $H_F$ in m und $\dot{V}$ in $m^3/h$ | Koeffizienten der Pumpenkennlinie                                                                                                                                                              |
| bp              |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
| cp              |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
| dp              |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
| $\dot{V}_{MAX}$ | $m^3/h$                                                                                                             | Rechtsseitige Volumenstrombegrenzung der Pumpenkennlinie aus Pumpenkatalog oder Näherungswert für einen mittleren Förderstrom (Wird nur als Startwert für die iterative Ermittlung verwendet.) |

**2.2.3. Beispiel**

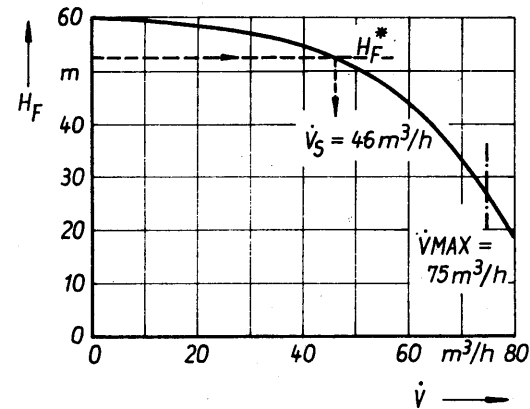
Für die im Bild 2.10 gezeigte Anordnung sind zwei Absicherungsvarianten zu überprüfen:

$$V = 1: p_{A,1} = 0,850 \text{ MPa}$$

$$V = 4: p_{A,2} = 0,798 \text{ MPa.}$$



**Bild 2.10** Geometrische und hydrostatische Gegebenheiten der im Beispiel 2.2.3. betrachteten Anlage



**Bild 2.11** Kennlinie der im Bild 2.10 eingesetzten Pumpe

Für die Pumpe gilt die im Bild 2.11 dargestellte Kennlinie. Sie wird durch die Gleichung

$$H_F = 60 - 0,133 \dot{V} + 0,0048 \dot{V}^2 - 0,00012 \dot{V}^3$$

gut beschrieben.

Als Betriebstemperatur ist näherungsweise  $t_p = 60 \text{ °C}$  anzunehmen. Die Dichte des Stickstoffpolsters betrage bei  $t_{DN} = 30 \text{ °C}$  und beim Ansprechdruck der Variante 1  $\rho_D = 9,67 \text{ kg/m}^3$ .

Es sind die Abblaseströme zu ermitteln.

**Lösung**

Zuerst werde der maximal mögliche Druck am Saugstutzen der Pumpe für die Dichte des Wassers von  $\rho_W = 983 \text{ kg/m}^3$  bestimmt. Die Schaltung entspricht der Form D im Bild 2.6. Somit gilt

$$p_p = (0,41 - 9,81 \cdot 983 \cdot 5 \cdot 10^{-6}) \text{ MPa} = 0,362 \text{ MPa.}$$

Für **Variante 1** liefert Gl. (2.17)

$$H_F^* = \left[ \frac{0,850 - 0,362}{9,81 \cdot 983} \cdot 10^6 + (2,2 - 0,4) \right] \text{ m} = 52,4 \text{ m.}$$

Im Bild 2.11 ergibt sich damit ein Schnittpunkt für  $\dot{V}_S = 46 \text{ m}^3/h$ , woraus gemäß Gl. (2.18) der abzuführende Wasserstrom

$$\dot{m}_{W,1} = \frac{46 \cdot 983}{3600} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 12,56 \text{ kg/s}$$

folgt.

Ist der Behälter zunächst mit dem Druckmedium gefüllt, so berechnet sich nach Gl. (2.19)

$$H_F^* = \frac{0,850 - 0,362}{9,81 \cdot 983} \cdot 10^6 \cdot \text{m} = 50,6 \text{ m.}$$

Hiermit ergibt sich im Bild 2.11 ein Schnittpunkt bei  $\dot{V}_S = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dies ist der maximale Volumenstrom. Nach Gl. (2.20) muß ein Druckmedienstrom von

$$\dot{m}_{D,1} = \frac{50}{3600} \cdot 9,67 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,134 \text{ kg/s}$$

im Ansprechfall abgeblasen werden.

Für **Variante 4** ist der Rechengang prinzipiell zu wiederholen. Es gilt nach Gl. (2.22)

$$H_F^* = \left[ \frac{0,798 - 0,362}{9,81 \cdot 983} \cdot 10^6 + (0,5 - 0,4) \right] \text{ m} = 45,3 \text{ m},$$

womit der Schnittpunkt mit der Pumpenkennlinie (Bild 2.11) bei etwa  $\dot{V}_S = 58 \text{ m}^3/\text{h}$  liegt.

Der abzuführende Wasserstrom ergibt sich nach Gl. (2.23) zu

$$\dot{m}_{W,2} = \frac{58 \cdot 983}{3600} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 15,84 \text{ kg/s}.$$

Das nach dem Flußbild 2.9 entwickelte Unterprogramm liefert die nachfolgenden Ergebnisse. Die Abweichungen ergeben sich durch das relativ ungenaue Ablesen des Schnittpunktes bei der manuellen Lösung:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |       |            |
|------------------------------------------------------------------------|-------|------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |       |            |
| Absicherungsvariante                                                   | V =   | 1          |
| Steuergröße                                                            | SG =  | 1          |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 = | 0.8500 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 =  | 2.200 m    |
| Behälterfüllung                                                        | W =   | 0.5        |
| Art des Druckmediums                                                   | DP =  | 1          |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb                               |       |            |
| Wasser                                                                 | tWN = | 30 °C      |
| Druckmedium                                                            | tDN = | 30 °C      |

| LF:ABS-P Unkontrollierter Wasserzufluß durch Pumpenförderung              |        |                 |
|---------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                        |        |                 |
| Druck an einem Punkt in der Saugrohrleitung                               | pRP =  | 0.410000 MPa    |
| Vorzeichenbehaftete Höhe dieses Punktes bezogen auf den Pumpensaugstutzen | HRP =  | -5.000 m        |
| Temperatur des zuströmenden Wassers                                       | tP =   | 60 °C           |
| Höhe des Pumpensaugstutzens                                               | HP =   | 0.400 m         |
| Koeffizienten der Pumpenkennlinie                                         | ap =   | 60.000          |
| ( HF = ap+bp*V+cp*V^2+dp*V^3 in m , V in m^3/h )                          | bp =   | -0.133000       |
|                                                                           | cp =   | 0.004800000     |
|                                                                           | dp =   | -0.000120000000 |
| Max. Pumpenförderstrom (Näherung)                                         | Vmax = | 75.000 m^3/h    |

**ERGEBNISSE:**

|                                  |          |              |
|----------------------------------|----------|--------------|
| Druck am Pumpensaugstutzen       | pP =     | 0.361764 MPa |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom | mW1P =   | 12.5178 kg/s |
| Dichte                           | RHOW1P = | 983.4 kg/m^3 |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom | mD1P =   | 0.1331 kg/s  |
| Dichte                           | RHOD1P = | 9.673 kg/m^3 |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |          |            |
|------------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |          |            |
| Absicherungsvariante                                                   | V =      | 4          |
| Steuergröße                                                            | SG =     | 1          |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 =    | 0.8500 MPa |
| Gegebener Ansprechdruck für SV2                                        | pA2 =    | 0.7980 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 =     | 2.200 m    |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2                                        | H2 =     | 0.500 m    |
| Behälterfüllung                                                        | W =      | 0.5        |
| Art des Druckmediums                                                   | DP =     | 1          |
| öffnungsverhältnis                                                     | Omega =  | 1.05       |
| Minimale Wassertemperatur                                              | tmin =   | 10 °C      |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb                               |          |            |
| Wasser                                                                 | tWN =    | 30 °C      |
| Druckmedium                                                            | tDN =    | 30 °C      |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                     |          |            |
| Verhältnis der Ansprechdrücke                                          | Omega* = | 1.07       |

| LF:ABS-P Unkontrollierter Wasserzufluß durch Pumpenförderung              |          |                 |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                        |          |                 |
| Druck an einem Punkt in der Saugrohrleitung                               | pRP =    | 0.410000 MPa    |
| Vorzeichenbehaftete Höhe dieses Punktes bezogen auf den Pumpensaugstutzen | HRP =    | -5.000 m        |
| Temperatur des zuströmenden Wassers                                       | tP =     | 60 °C           |
| Höhe des Pumpensaugstutzens                                               | HP =     | 0.400 m         |
| Koeffizienten der Pumpenkennlinie                                         | ap =     | 60.000          |
| ( HF = ap+bp*V+cp*V^2+dp*V^3 in m , V in m^3/h )                          | bp =     | -0.133000       |
|                                                                           | cp =     | 0.004800000     |
|                                                                           | dp =     | -0.000120000000 |
| Max. Pumpenförderstrom (Näherung)                                         | Vmax =   | 75.000 m^3/h    |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                        |          |                 |
| Druck am Pumpensaugstutzen                                                | pP =     | 0.361764 MPa    |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                                          | mW2P =   | 15.7393 kg/s    |
| Dichte                                                                    | RHOW2P = | 983.4 kg/m^3    |

## 2.3. Zuströmung von Wasser über ein Stellventil

Fällt die im Bild 2.12 dargestellte Druckregelung (PC) oder eine äquivalent arbeitende Wasserstandsregelung aus, so wird bei abgesperrtem Behälterabfluß und entsprechenden Drücken eines der Sicherheitsventile ansprechen.

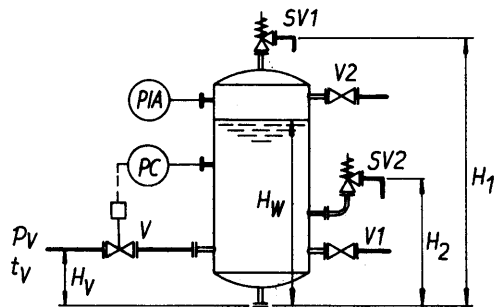


Bild 2.12 Zuströmung von Wasser im Havariefall durch Ausfall der Druckregelung

Index des Lastfalles: V

Charakteristische Eingangsgrößen:

- $p_V$  Druck vor dem Stellventil  
 $H_V$  Höhe des Stellventils  
 $t_V$  Temperatur vor dem Stellventil.

### 2.3.1. Algorithmus

Der Durchsatz durch ein Stellventil V ist vom Vordruck  $p_V$ , vom Nachdruck  $p_{ND}$ , von der Eintrittstemperatur  $t_V$  und von der Armaturengeometrie abhängig. Nach /2/ kann man folgende Einteilung vornehmen:

1. Bei der **kavitationsfreien Strömung** gilt  $\dot{m} = K_1 \sqrt{p_V - p_{ND}}$ .
2. Wird in der Armatur der Siededruck unterschritten, so ist infolge **Kavitation** der Durchsatz  $\dot{m}$  nahezu unabhängig vom Differenzdruck ( $p_V - p_{ND}$ ).
3. Ist der Nachdruck kleiner als der Siededruck  $p_S$  des Fluids, so kommt es zur **bleibenden Teilverdampfung (Flashing)**. Der Durchsatz kann wie im ersten Fall durch  $\dot{m} = K_2 \sqrt{p_V - p_{ND}}$  beschrieben werden, wobei  $K_2 < K_1$  gilt (Größenordnung:  $K_2/K_1 \approx 0,3 \dots 0,7$ ).
4. Bei einem weiteren Absinken des Nachdruckes  $p_{ND}$  ergibt sich ein von dieser Größe unabhängiger Durchsatz  $\dot{m}$ . Man spricht vom **kritischen Durchfluß mit bleibender Teilverdampfung (Critical flashing)**.

In /13/ sind die Bereiche 1 bis 3 experimentell untersucht worden. Es ergaben sich die im Bild 2.13 dargestellten qualitativen Verläufe.

Im IEC-Standard /9, 10/ sind nur für die ersten beiden Fälle Berechnungsvorschriften genannt. Sie setzen aber Armaturenkennwerte voraus, die in der Regel nicht verfügbar

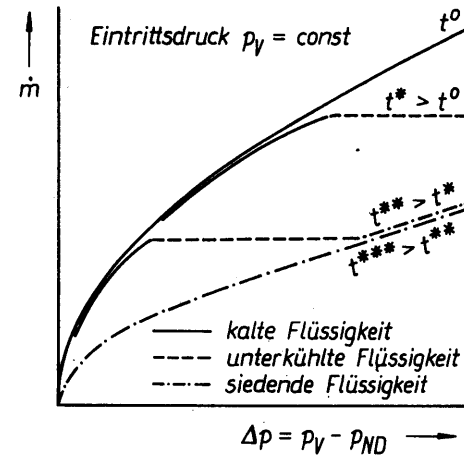


Bild 2.13 Wasserdurchfluß durch eine Drosselarmatur in Abhängigkeit des Differenzdruckes und der Temperatur

sind. Bild 2.13 zeigt, daß die Berechnung nach dem ersten Fall stets die größten Durchsätze liefert, d.h., aus der Sicht der Lastannahme befindet man sich stets auf der "sicheren" Seite.

#### Fall 1

Nach /8, 9/ gilt für den Durchsatz durch eine Stellarmatur die Größengleichung

$$\dot{m} = k_V \sqrt{\rho \Delta p} \quad (2.25)$$

mit

- $k_V$  Ventilkoeffizient als reduzierte Durchströmfläche  
 $\rho$  Dichte  
 $\Delta p$  Druckdifferenz, die über dem Ventil abfällt.

Üblicherweise arbeitet man aber mit der zugeschnittenen Größengleichung

$$\dot{m} = 0,028 k_V^* \sqrt{\rho_W (p_V - p_{ND})} \quad \text{in kg/s,} \quad (2.26)$$

wobei bedeuten

|           |                   |                                          |
|-----------|-------------------|------------------------------------------|
| $\dot{m}$ | kg/s              | Wasserstrom                              |
| $k_V^*$   | m <sup>3</sup> /h | Ventilkoeffizient gemäß Herstellerangabe |
| $\rho_W$  | kg/m <sup>3</sup> | Dichte des Wassers bei $t_V$             |
| $p_V$     | MPa               | Vordruck                                 |
| $p_{ND}$  | MPa               | Nachdruck.                               |

Bei nicht-turbulenter Strömung wäre auf der rechten Seite der Gl. (2.26) noch  $F_R$  - der sogenannte REYNOLDSzahl-Faktor - multiplikativ zu ergänzen /9/. Es gilt  $F_R < 1$ . Für übliche Stellventile mit Durchflußmedium Wasser ist jedoch im Havariefall turbulente Armaturendurchströmung ( $F_R = 1$ ) anzunehmen, so daß Gl. (2.26) wie angegeben gilt.

## Fall 2

Infolge von Kavitation kann bei konstanten Vordrücken, aber kleiner werdenden Nachdrücken eine Durchflußbegrenzung auftreten. Ein Stellventil im Regelkreis darf nie für einen derartigen Betrieb ausgelegt werden. Im hier zu betrachtenden Havariefall sind solche Parameterkonstellationen aber denkbar.

Nach /9, 10/ berechnet sich der maximale Massestrom für diesen Fall zu

$$\dot{m}_{\max} = 0,028 \, k_V^* F_L \sqrt{\rho_W (p_V - p_{VC})} \quad \text{in kg/s.} \quad (2.27)$$

Dabei stellt

$$F_L = \sqrt{\frac{p_V - p_{ND}^*}{p_V - p_{VC}}} \quad (2.28)$$

den **Druckrückgewinnfaktor** dar. Er ist von der inneren Armaturengeometrie abhängig, muß experimentell ermittelt und vom Hersteller benannt werden (Größenordnung:  $F_L \approx 0,5 \dots 0,95$ ).

Der Druck  $p_{VC}$  tritt in der Vena contracta beim kritischen Druckverhältnis (Durchflußbegrenzung) auf. Für ihn gilt in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur  $t_V$  nach /9/ für Wasser

|                 |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_V$ in °C     | 20    | 40    | 60    | 80    | 100   |
| $p_{VC}$ in MPa | 0,002 | 0,007 | 0,019 | 0,044 | 0,095 |

|                 |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_V$ in °C     | 120   | 140   | 160   | 180   | 200   |
| $p_{VC}$ in MPa | 0,185 | 0,334 | 0,564 | 0,900 | 1,367 |

bzw. die Approximation

$$p_{VC} = 574 \cdot 10^{-6} \exp(0,07254 \, t_V - 288,7 \cdot 10^{-6} \, t_V^2 + 0,8776 \cdot 10^{-6} \, t_V^3 - 1,3964 \cdot 10^{-9} \, t_V^4) \quad \text{in MPa} \quad (2.29)$$

Geltungsbereich:  $0^\circ\text{C} \leq t_V \leq 180^\circ\text{C}$

Maximaler Fehler: 0,5 %.

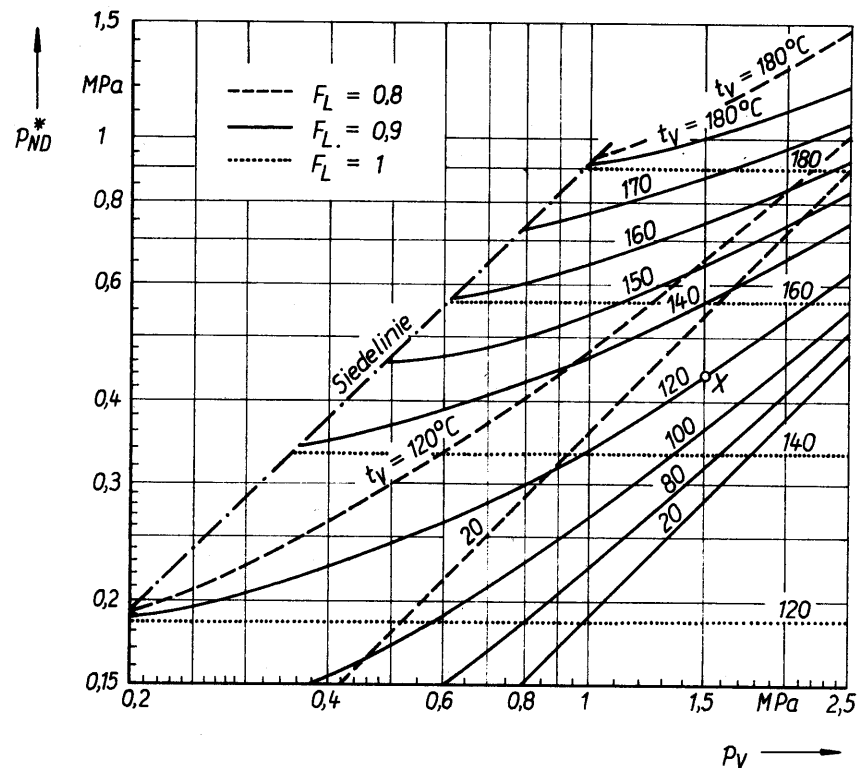
In Gl. (2.28) stellt  $(p_V - p_{ND}^*)$  den kleinsten Differenzdruck dar, bei dem die Durchflußbegrenzung mit  $\dot{m} = \dot{m}_{\max}$  gemäß Fall 2 gerade wirksam wird. Wenn

$$p_{ND} < p_{ND}^* = p_V - F_L^2 (p_V - p_{VC}) \quad (2.30)$$

gilt, ist der reale Wert nach Gl. (2.27) kleiner als der nach formalem Einsetzen aus Gl. (2.26) folgende.

Die Gl. (2.30) ist im Bild 2.14 grafisch ausgewertet. Ein Beispiel soll die diffizile Problematik veranschaulichen.

Die gegebenen Drücke  $p_V = 1,5 \text{ MPa}$  und  $p_{ND} = 0,44 \text{ MPa}$  charakterisieren den Punkt X im Bild 2.14. Für die Eintrittstemperatur  $t_V = 120^\circ\text{C}$  folgen für unterschiedliche Arma-



**Bild 2.14** Nachdruck  $p_{ND}^*$ , bei dem in Abhängigkeit der gegebenen Größen Vordruck  $p_V$ , Eintrittstemperatur  $t_V$  und Druckrückgewinnfaktor  $F_L$  beim Durchströmen einer Stellarmatur die Durchflußbegrenzung (Fall 2) beginnt.

turenkennwerte  $F_L$  die signifikanten Druckdifferenzen  $p_V - p_{ND}^* = F_L^2 (p_V - p_{VC})$  entweder direkt aus der Diagrammablesung  $p_{ND}^* = f(p_V; t_V; F_L)$  oder nach Errechnung von  $p_{VC}$  gemäß Gl. (2.29). Es gelten:

| $F_L$ | $p_V - p_{ND}^*$<br>MPa | Bemerkungen                   |
|-------|-------------------------|-------------------------------|
| 0,8   | 0,84                    | Durchflußbegrenzung vorhanden |
| 0,9   | 1,06                    | Durchflußbegrenzung erreicht  |
| 1     | 1,32                    | keine Durchflußbegrenzung     |

Die Masseströme  $\dot{m}$ , die gleichzeitig die Lastannahmen für die Sicherheitsventile darstellen, verhalten sich wie die Wurzeln aus den Druckdifferenzen:

$$\dot{m}_{0,8} : \dot{m}_{0,9} : \dot{m}_1 = 0,92 : 1,03 : 1,15.$$

Fazit

- Angesichts des relativ komplizierten Berechnungsganges, des in der Regel unbekannten Armaturenkenwertes  $F_L$  und der theoretisch noch nicht exakt gesicherten Größe des Konstantbereiches gemäß Fall 2 wird für siedende und unterkühlte Flüssigkeiten im weiteren stets mit Gl. (2.26) gerechnet und eine teilweise Überbemessung in Kauf genommen.
- Da die Stellung der Ventilspindel beispielsweise bei Stromausfall unbekannt ist, muß sicherheitshalber stets mit vollgeöffnetem Ventil gerechnet werden. In Gl. (2.26) ist für  $k_V^*$  der  $k_{VS}^*$ -Wert, gegebenenfalls unter Beachten der oberen Fertigungstoleranz, einzusetzen.

Die Ermittlung des Druckes nach der Armatur  $p_{ND}$  folgt aus der hydrostatischen Bilanz in Abhängigkeit der im Abschnitt 2.1. definierten Varianten.  
Tritt keine Teilverdampfung auf, so ist  $\rho_W$  zugehörig zur Temperatur  $t_V$  zu bilden.

Variante 1

Bei Ansprechdruck  $p_{A,1}$  und **Wasservollfüllung**  $H_1$  gilt

$$p_{ND} = p_{A,1} + g \rho_W (H_1 - H_V). \quad (2.31)$$

Der mit diesem Wert gemäß Gl. (2.26) errechnete Massestrom entspricht dem Abblasestrom des SV1

$$\dot{m}_{W,1} = \dot{m}. \quad (2.32)$$

Bei **Wasserteilfüllung** muß zuerst das Druckmedium abgeblasen werden. Der größte Massestrom entsteht beim kleinsten Nachdruck  $p_{ND}$ . Dieser ergibt sich beim niedrigsten Wasserstand  $H_V$ . Es gelten dann

$$p_{ND} = p_{A,1} \quad (2.33)$$

und nach Auswertung von Gl. (2.26) und Umrechnung gemäß Gl. (2.5)

$$\dot{m}_{D,1} = \dot{m} \frac{\rho_{DN}}{\rho_W}. \quad (2.34)$$

Die Dichte des Druckmediums  $\rho_{DN}$  ist für  $p_{A,1}$  und  $t_{DN}$  zu bilden.

Tritt **Teilverdampfung** des zuströmenden Wassers ein, so wird der hydrostatische Druck des Dampf-Wasser-Gemisches wie bei reinen Gasen und Dämpfen vernachlässigt und somit

$$p_{ND} = p_{A,1} \quad (2.35)$$

gesetzt. Dies ist akzeptabel, da beispielsweise für einen Dampfgehalt  $x_{WD} = 0,1$  die Dichten  $5,9 \text{ kg/m}^3$  für  $p = 0,1 \text{ MPa}$  sowie  $49 \text{ kg/m}^3$  für  $p = 1 \text{ MPa}$  betragen.

Die abzublasenden Masseströme betragen bei Wasservollfüllung mit dem nach Gl. (2.11) zu berechnenden Dampfgehalt  $x_{WD}$

$$\dot{m}_{WD,1} = x_{WD} \dot{m} \quad (2.36)$$

$$\dot{m}_{W,1} = \dot{m} - \dot{m}_{WD,1}, \quad (2.37)$$

wobei  $\dot{m}$  nach Gl. (2.26) bestimmt wird. Die Dichte des Wasserdampfes  $\rho_{WD}$  entspricht der des gesättigten Wasserdampfes  $\rho_S(p_{A,1})$  nach Gl. (A3). Die Dichte des Wassers im Behälter  $\rho_W$  ist für die zu  $p_{A,1}$  gehörige Siedetemperatur  $t_S$  zu bilden, wobei  $t_S$  aus Gl. (A6) folgt.

Bei Wasserteilfüllung und aufgelastetem Druckmedium werden gemäß Abschnitt 2.1.1. "Lastannahme bei Phasenwechsel des Zuflußmediums durch Entspannung" zwei zeitliche Belastungsphasen betrachtet. Zuerst strömt das Druckmedium

$$\dot{m}_{D,1} = \left( \frac{\dot{m}_{WD,1}}{\rho_{WD}} + \frac{\dot{m}_{W,1}}{\rho_W} \right) \rho_{DN} \quad (2.38)$$

und anschließend Naßdampf mit den Komponenten  $\dot{m}_{WD,1}$  und  $\dot{m}_{W,1}$  entsprechend den Berechnungsgleichungen (2.36) und (2.37) bei Bezug auf Gl. (2.35) ab. Als Dichten sind anzusetzen:  $\rho_{WD} = \rho_S(p_{A,1})$ ;  $\rho_W = \rho_W(t_S)$ ;  $\rho_{DN} = \rho_G(t_{DN}, p_{A,1})$ .

Variante 2

Die Berechnung des Nachdruckes ergibt

$$p_{ND} = p_{A,2} + g \rho_W (H_2 - H_V). \quad (2.39)$$

Der nach Gl. (2.26) berechnete Massestrom  $\dot{m}$  stellt dann den Abblasestrom des Sicherheitsventils SV2 dar:

$$\dot{m}_{W,2} = \dot{m}. \quad (2.40)$$

Für mögliche **Teilverdampfung** ist die Absicherungsvariante 2 nicht zulässig.

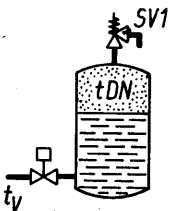
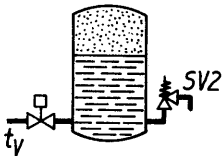
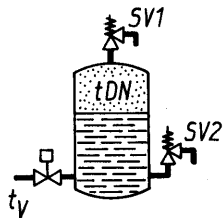
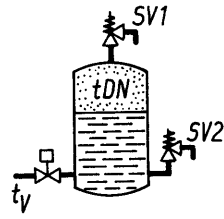
Variante 3

Obwohl SV1 zuerst anspricht, wird bei **Wasservollfüllung** gemäß Lastannahme (Abschnitt 2.1.1. - Prämissen -) der gesamte Abblasestrom dem Sicherheitsventil SV2 zugewiesen. Damit gelten die Gl'n. (2.39) und (2.40) uneingeschränkt.

Bei **Wasserteilfüllung** ist bei Erreichen des Druckes  $p_{A,1}$  das Druckmedium über SV1 abzuleiten. Die Berechnung hat nach den Gl'n. (2.33), (2.26) und (2.34) zu erfolgen. Tritt **Teilverdampfung** auf, so ist bei Wasservollfüllung von SV1 der Naßdampf wie bei Variante 1 - Gl'n. (2.35) bis (2.37) - abzuführen.

Bei Wasserteilfüllung tritt ebenfalls die gleiche Belastung wie bei Variante 1 auf. Jedoch ist zuerst der Druckmedienstrom nach Gl. (2.38) und danach der Naßdampfstrom

**Tabelle 2.3** Lastannahmen bei Stellventil-Zufluß (V)

| Schaltung / Variante                                                                            | Phase                                                                                                             | Abblasesstrom                                                   | Dichte                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>V = 1</p>   | I 1)                                                                                                              | $\dot{m}_{D1V}$                                                 | $\rho_{D1V} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                 |
|                                                                                                 | II                                                                                                                | $\dot{m}_{W1V}$                                                 | $\rho_{W1V} = \rho_W(t_V)$                                                                |
|                                                                                                 | Last bei <b>Teilverdampfung</b> nach dem Stellventil:                                                             |                                                                 |                                                                                           |
|                                                                                                 | I 1)                                                                                                              | $\dot{m}_{D1V}$                                                 | $\rho_{D1V} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                 |
|  <p>V = 2</p>   | Bei <b>Teilverdampfung</b> nach dem Stellventil ist diese Anordnung des Sicherheitsventils <b>nicht zulässig!</b> |                                                                 |                                                                                           |
|                                                                                                 |                                                                                                                   | $\dot{m}_{W2V}$                                                 | $\rho_{W2V} = \rho_W(t_V)$                                                                |
|                                                                                                 |                                                                                                                   |                                                                 |                                                                                           |
|                                                                                                 |                                                                                                                   |                                                                 |                                                                                           |
|  <p>V = 3</p>  | I 1)                                                                                                              | $\dot{m}_{D1V}$                                                 | $\rho_{D1V} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                 |
|                                                                                                 | II 2)                                                                                                             | $\dot{m}_{W2V}$                                                 | $\rho_{W2V} = \rho_W(t_V)$                                                                |
|                                                                                                 | Last bei <b>Teilverdampfung</b> nach dem Stellventil:                                                             |                                                                 |                                                                                           |
|                                                                                                 | I 1)                                                                                                              | $\dot{m}_{D1V}$                                                 | $\rho_{D1V} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                 |
|  <p>V = 4</p> | II                                                                                                                | $\begin{bmatrix} \dot{m}_{WD1V} \\ \dot{m}_{W1V} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \rho_{WD1V} = \rho_S(p_{A,1}) \\ \rho_{W1V} = \rho_W(t_S) \end{bmatrix}$ |
|                                                                                                 |                                                                                                                   | $\dot{m}_{W2V}$                                                 | $\rho_{W2V} = \rho_W(t_V)$                                                                |
|                                                                                                 | Last bei <b>Teilverdampfung</b> nach dem Stellventil:                                                             |                                                                 |                                                                                           |
|                                                                                                 | I 1)2)                                                                                                            | $\dot{m}_{D1V}$                                                 | $\rho_{D1V} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                 |
|                                                                                                 | II 2)                                                                                                             | $\begin{bmatrix} \dot{m}_{WD1V} \\ \dot{m}_{W1V} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \rho_{WD1V} = \rho_S(p_{A,1}) \\ \rho_{W1V} = \rho_W(t_S) \end{bmatrix}$ |

1) Bei W=1 entfällt Phase I.      2) Lastannahme nicht eindeutig  
 [ ] Beide Masseströme gehören zu einem Lastfall.  
 $t_S$  Siedetemperatur des Wassers beim Abblasedruck

mit den nach den Gln. (2.36) und (2.37) berechneten Komponenten abzublasen. Bei dieser theoretischen Lastzuordnung entsteht keine Belastung für das Sicherheitsventil SV2.

**Variante 4**

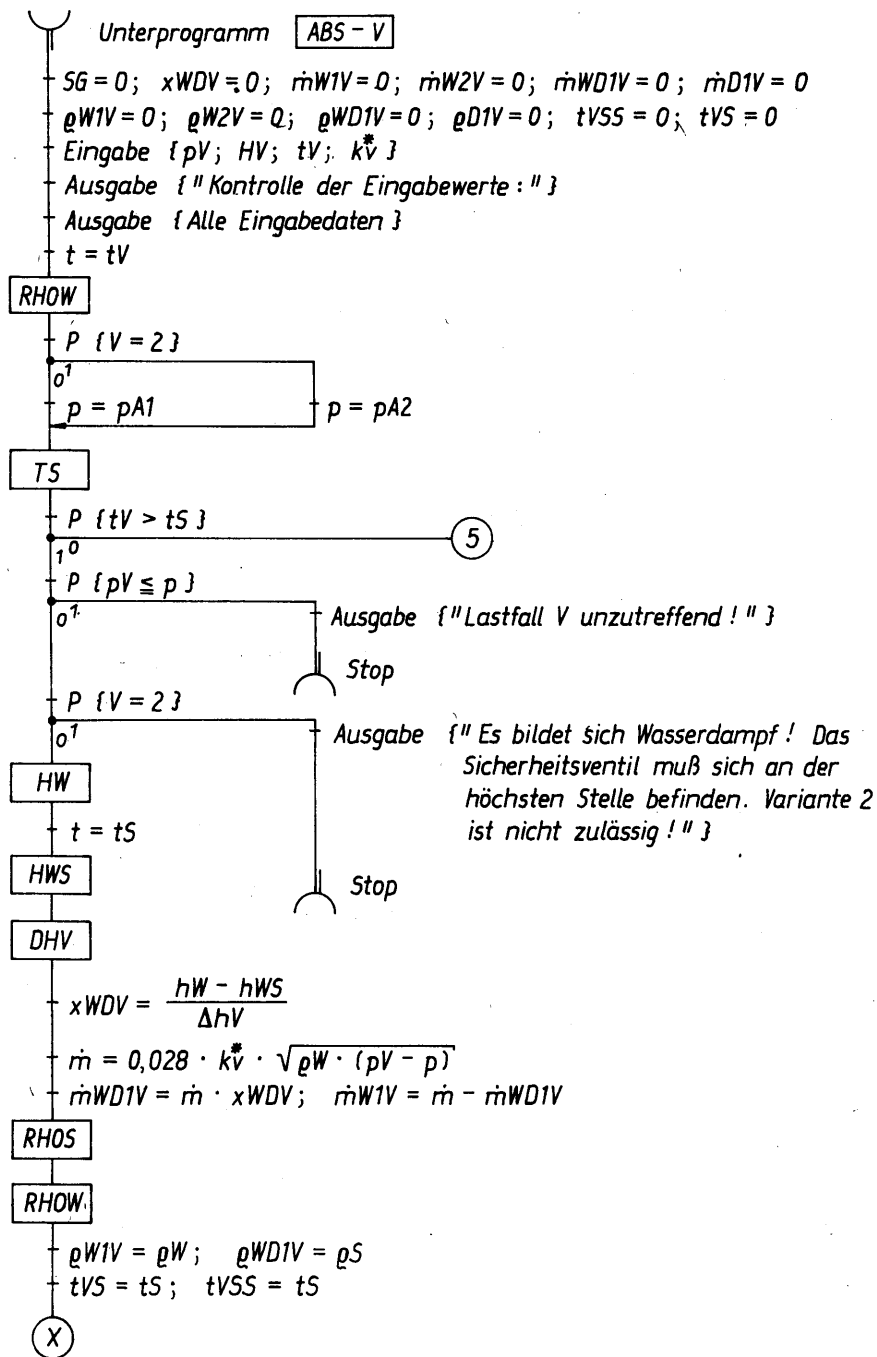
Für das Abströmen des nicht verdampften Wassers über SV2 gelten die gleichen Grundlagen wie bei Variante 2 fixiert.  
 Bei **Teilverdampfung** und **Wasservollfüllung** muß SV1 den entstehenden Naßdampfstrom wie bei Variante 1 - Gln. (2.35) bis (2.37) - abführen.  
 Bei **Wasserteilfüllung** ist in der zeitlich ersten Phase das Druckmedium und in der zweiten Phase der Naßdampf abzuleiten, wobei die Gln. (2.35) bis (2.38) bedeutungsvoll sind. Als Bezugsdruck ist  $p_{A,1}$  zu verwenden.  
 Da der gesamte Zufluß  $\dot{m}$  gemäß Annahme (Abschnitt 2.1.1. - Prämissen -) in Form von Naßdampf abgeführt wird, entsteht für SV2 theoretisch keine Belastung.

**Zusammenfassung**

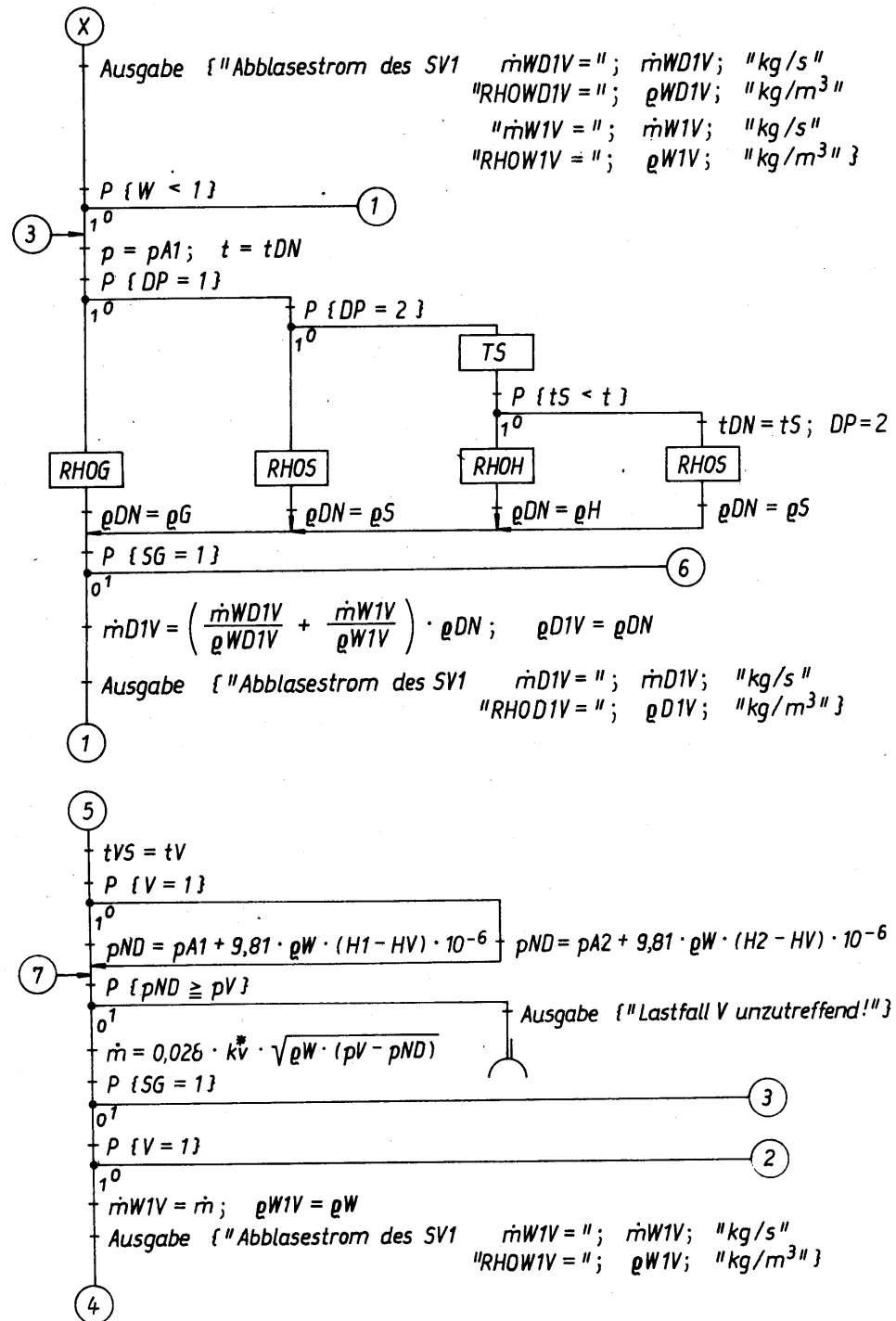
Die modellmäßig abgeleiteten Lastkombinationen sind variantenabhängig in Tabelle 2.3 aufgeführt. Die Indizierung stimmt mit der Darstellung im nachfolgenden Unterprogramm überein.

**2.3.2. Unterprogramm**

Der Datenflußplan ist im Bild 2.15 dargestellt. Er wird nachfolgend beschrieben. Ausgehend von der Temperatur  $t_V$ , die der Wasserstrom vor der Reduzierarmatur hat und der zum jeweiligen Ansprechdruck der Sicherheitsventile  $p$  gehörigen Siedetemperatur  $t_S$ , die mit Modul **TS** (siehe Anhang) berechnet wird, folgt der Test ( $t_V > t_S$ ). Bei Erfüllung entsteht teilweise Dampf. Damit scheidet die Variante 2 zur Behälterabsicherung aus. Nach Anwenden der Module **HW** Enthalpie des einströmenden Wassers, **HWS** Enthalpie des Siedewassers und **DHV** Verdampfungsenthalpie wird gemäß Gl. (2.11) der Dampfgehalt  $x_{WDV}$  des bei der Entspannung entstehenden Naßdampfes berechnet. Mit Modul **RHOS** erhält man zugehörig zum Druck  $p$  die Dichte des gesättigten Wasserdampfes  $\rho_{WD1V}$ . Die Dichte des Wasseranteils  $\rho_{W1V}$  folgt in guter Näherung für  $t_S$  aus **RHOW**. Der Massestrom berechnet sich mit Gl. (2.26) für die Druckdifferenz ( $p_V - p$ ). Die Aufteilung in die Komponenten des Naßdampfes  $\dot{m}_{WD1V}$  und  $\dot{m}_{W1V}$  ergibt sich unter Anwendung der Gln. (2.36) und (2.37). Ist der Wasserfüllstand  $W < 1$ , so muß als weiterer Lastfall die Verdrängung des Druckmediums betrachtet werden. Die Bestimmung der Dichte erfolgt stoffabhängig in gleicher Weise wie bereits zugehörig zum Flußbild 2.9 beschrieben. Der abzublasende Druckmedienstrom  $\dot{m}_{D1V}$  ergibt sich aus Gl. (2.38). Bei Nichterfüllung des Testes ( $t_V > t_S$ ) tritt keine Ausdampfung auf. Der Ablauf wird ab Konnektor ⑤ fortgesetzt. Der Nachdruck  $p_{ND}$  berechnet sich im Ansprechfall bei



**Bild 2.15** Flußplan des Unterprogramms **ABS-V** (Abblasestrom - Ventilaufstrom) zur Ermittlung der Abblaseströme infolge unkontrollierter Wasserzuströmung bei Ausfall der Druckregelung



**Bild 2.15(2)**

$$p_{ND} = 0,850 \text{ MPa},$$

G1. (2.26)

$$\dot{m} = 0,028 \cdot 33 \cdot \sqrt{959 \cdot (1,2 - 0,85)} \text{ kg/s} = 16,93 \text{ kg/s},$$

G1. (2.34)

$$\dot{m}_{D,1} = 16,93 \cdot \frac{9,67}{959} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,17 \text{ kg/s}.$$

Das nach Flußbild 2.15 erstellte Unterprogramm liefert die nachfolgenden Ergebnisse:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |                  |
| Absicherungsvariante                                                   | V = 1            |
| Steuergröße                                                            | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 = 0.8500 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 = 2.200 m     |
| Behälterfüllung                                                        | W = 0.5          |
| Art des Druckmediums                                                   | DP = 1           |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb                               |                  |
| Wasser                                                                 | tWN = 30 °C      |
| Druckmedium                                                            | tDN = 30 °C      |

| LF:ABS-V Unkontrollierter Wasserzufluß über ein Stellventil |                                  |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                          |                                  |
| Druck vor dem Stellventil                                   | pV = 1.200000 MPa                |
| Höhe des Armatureneintritts                                 | HV = 0.300 m                     |
| Temperatur des zuströmenden Wassers                         | tV = 100 °C                      |
| Ventilkoeffizient mit Plustoleranz                          | kv* = 33.000 m <sup>3</sup> /h   |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                          |                                  |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                            | mW1V = 16.4903 kg/s              |
| Dichte                                                      | RHOW1V = 959.0 kg/m <sup>3</sup> |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                            | mD1V = 0.1708 kg/s               |
| Dichte                                                      | RHOD1V = 9.673 kg/m <sup>3</sup> |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |                  |
| Absicherungsvariante                                                   | V = 4            |
| Steuergröße                                                            | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 = 0.8500 MPa |
| Gegebener Ansprechdruck für SV2                                        | pA2 = 0.7980 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 = 2.200 m     |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2                                        | H2 = 0.500 m     |
| Behälterfüllung                                                        | W = 0.5          |
| Art des Druckmediums                                                   | DP = 1           |
| Öffnungsverhältnis                                                     | Omega = 1.05     |
| Minimale Wassertemperatur                                              | tmin = 10 °C     |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb                               |                  |
| Wasser                                                                 | tWN = 30 °C      |
| Druckmedium                                                            | tDN = 30 °C      |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                     |                  |
| Verhältnis der Ansprechdrücke                                          | Omega* = 1.07    |

| LF:ABS-V Unkontrollierter Wasserzufluß über ein Stellventil |                                  |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                          |                                  |
| Druck vor dem Stellventil                                   | pV = 1.200000 MPa                |
| Höhe des Armatureneintritts                                 | HV = 0.300 m                     |
| Temperatur des zuströmenden Wassers                         | tV = 100 °C                      |
| Ventilkoeffizient mit Plustoleranz                          | kv* = 33.000 m <sup>3</sup> /h   |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                          |                                  |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                            | mW2V = 18.0997 kg/s              |
| Dichte                                                      | RHOW2V = 959.0 kg/m <sup>3</sup> |

## 2.4. Zuströmung von Druckmedium über eine Drosselstelle

Ist der im Bild 2.17 dargestellte Druckminderer M defekt, so kann bei ungeregeltem Zufluß des Auflastmediums (z.B. Stickstoff oder Wasserdampf) und geschlossenen Ventilen V1 und V3 eine Drucksteigerung eintreten, die zum Ansprechen eines der Sicherheitsventile führt.

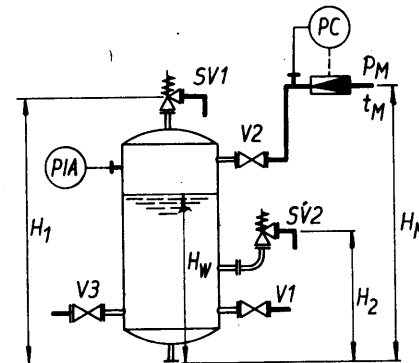


Bild 2.17 Zuströmung von Druckmedium im Havariefall durch Ausfall der Druckregelung

Index des Lastfalles: M

Charakteristische Eingangsgrößen:

$p_M$  Druck des Druckmediums vor dem Druckminderer  
 $H_M$  Höhe des Druckminderers  
 $t_M$  Temperatur vor dem Druckminderer.

### 2.4.1. Algorithmus

Nach /11, 12/ kann der Durchsatz durch den Druckminderer nach der zugeschnittenen Größengleichung

$$\dot{m} = 0,028 k_V^* \left(1 - \frac{x}{2,143 x_T}\right) \sqrt{x p_M \rho_M} \quad \text{in kg/s} \quad (2.41)$$

berechnet werden. Im einzelnen bedeuten:

|                                                                                               |                    |                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| $\dot{m}$                                                                                     | kg/s               | Druckmedienstrom                                  |
| $k_V^*$                                                                                       | m <sup>3</sup> /h  | Ventilkoeffizient nach Herstellerangabe           |
| $x$                                                                                           | -                  | Differenzdruckverhältnis                          |
| $x = \text{Min} \left\{ \frac{p_M - p_{ND}}{p_M}; \frac{x}{1,4} x_T \equiv x_{\max} \right\}$ |                    |                                                   |
| $x$                                                                                           | -                  | Isentropenexponent                                |
| $x_T$                                                                                         | -                  | Modifiziertes kritisches Differenzdruckverhältnis |
| $p_M$                                                                                         | MPa                | Druck des Druckmediums vor dem Druckminderer      |
| $p_{ND}$                                                                                      | MPa                | Druck des Druckmediums nach dem Druckminderer     |
| $\rho_M$                                                                                      | m <sup>3</sup> /kg | Dichte des Druckmediums vor dem Druckminderer     |
| (Die Berechnung aus $p_M$ und $t_M$ ist mit den Gl. (A2) bis (A4) möglich.)                   |                    |                                                   |
| $t_M$                                                                                         | °C                 | Temperatur vor dem Druckminderer.                 |

Die Gl. (2.41) ist im Bild 2.18 für Luft und Stickstoff sowie für zwei verschiedene  $x_T$ -Werte grafisch ausgewertet.

Der Massestrom kann bei fehlenden Angaben über  $x_T$  in guter Näherung auch nach der konventionellen Methode /8, S. 482/ ermittelt werden.

Für den Ventilkoeffizienten ist der Größtwert ( $k_{VS}^*$ -Wert plus positiver Fertigungstoleranz) einzusetzen. Für Blenden gilt nach /8/

$$k_V^* = \frac{\sqrt{2}}{28} A_D \alpha = 0,04 d_D^2 \alpha \quad \text{in m}^3/\text{h} \quad (2.43)$$

mit dem Durchflußbeiwert

$$\alpha = (1 + 0,707 \sqrt{1 - A_D/A} - A_D/A)^{-1} \quad (2.44)$$

und den Flächen

|       |                 |                                                          |
|-------|-----------------|----------------------------------------------------------|
| $A_D$ | mm <sup>2</sup> | Drosselquerschnitt (Blendenöffnung $A_D = \pi d_D^2/4$ ) |
| $A$   | mm <sup>2</sup> | Rohrquerschnitt ( $A = \pi d^2/4$ )                      |
| $d_D$ | mm              | Durchmesser der Blendenöffnung                           |
| $d$   | mm              | Rohrinnendurchmesser.                                    |

Der  $\alpha$ -Wert nach Gl. (2.44) kann auch Bild 2.19 entnommen werden.

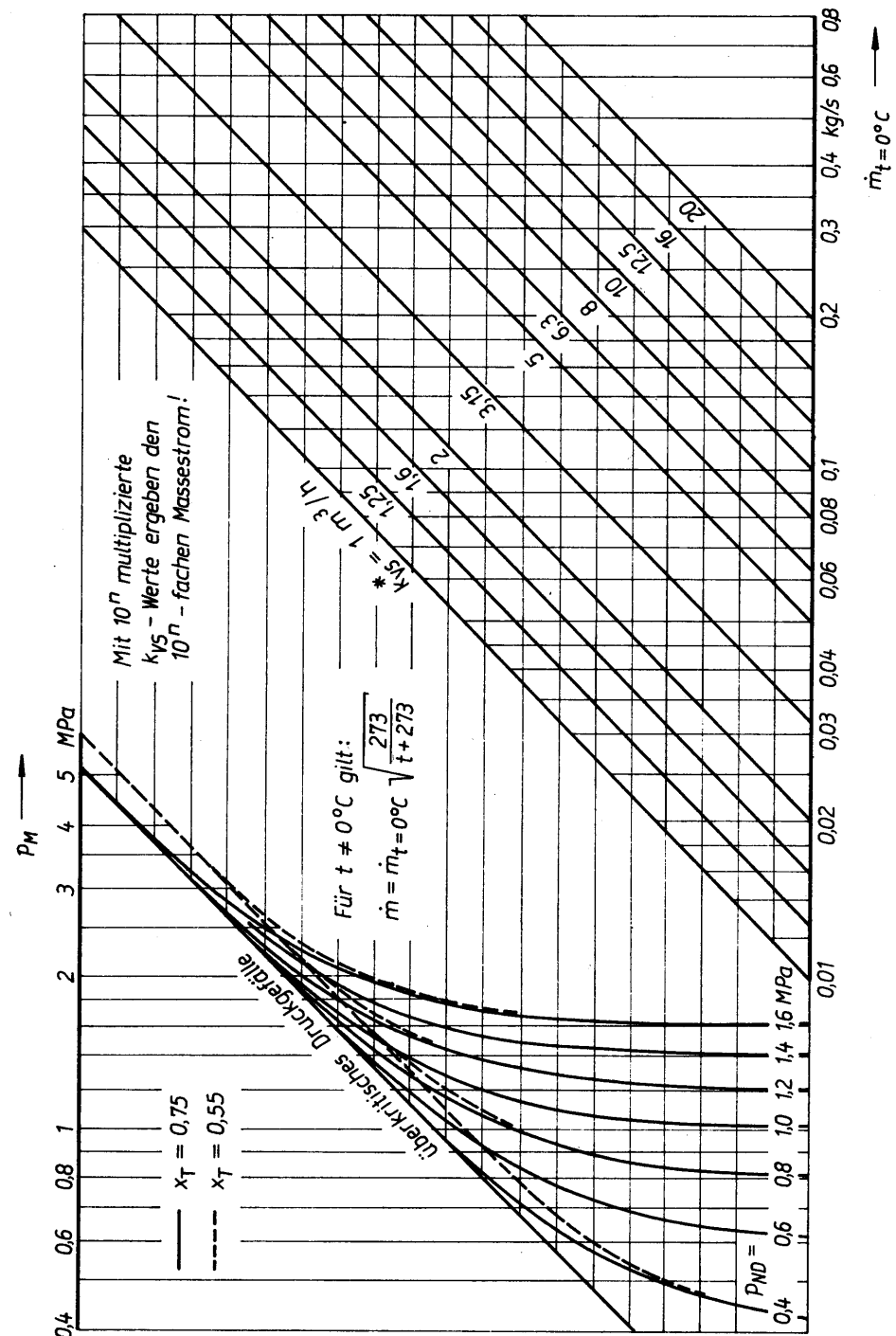
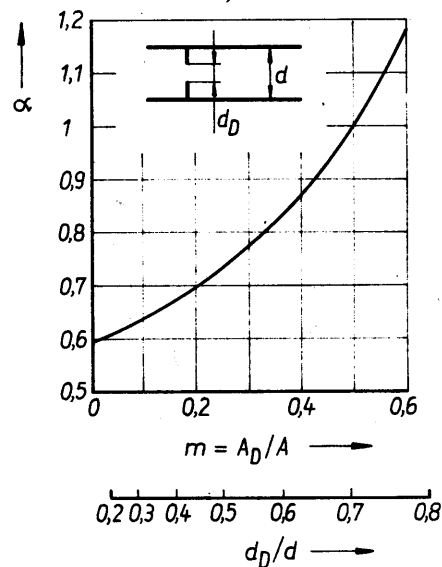


Bild 2.18 Luft- oder Stickstoffstrom durch eine Drosselarmatur



**Bild 2.19** Durchflußbeiwert  $\alpha$  einer Drosselblende, deren geometrische Verhältnisse einer Meßblende entsprechen

Der Isentropenexponent ist stoffabhängig. Es gelten:

- $\kappa = 1,4$  Luft, Stickstoff
- $\kappa = 1,135$  Sattdampf (Näherung)
- $\kappa = 1,3$  Heißdampf (Näherung).

Der Armaturenkennwert  $x_T$  ist vom Hersteller zu benennen. Überschlägig gelten nach /12/ für Einsitzventile in Durchgangsform in Abhängigkeit der Art des Drosselkörpers:

- $x_T = 0,75$  Schlitzkegel
- $x_T = 0,72$  Konturkegel mit Durchfluß entgegen der Schließrichtung
- $x_T = 0,55$  Konturkegel mit Durchfluß in Schließrichtung
- $x_T = 0,75$  Käfigkörper mit Durchfluß entgegen der Schließrichtung
- $x_T = 0,70$  Käfigkörper mit Durchfluß in Schließrichtung.

Für Blenden ist näherungsweise

- $x_T = 0,55$   
anzunehmen.

Die Gl. (2.41) gilt für unter- und überkritisches Druckgefälle. Die real vorhandene Durchsatzbegrenzung wird durch das Druckverhältnis  $x$ , das gemäß Gl. (2.42) einen Maximalwert nicht überschreiten darf, rechnerisch richtig wiedergegeben.

Leider werden oftmals Drosseleinrichtungen eingesetzt, deren  $\kappa_{VS}^*$ - und  $x_T$ -Werte vom Hersteller nicht angegeben werden. Unter diesen Umständen kann man bei blendenähnlichen Öffnungen näherungsweise wie folgt vorgehen:

- Der geometrisch engste Strömungsquerschnitt  $A$  in  $\text{mm}^2$  wird ermittelt bzw. vom Hersteller erfragt. Es kann dies ein Sitzquerschnitt, eine Bohrung oder die Öffnung einer Drosselscheibe sein.
- Der Querschnitt  $A$  wird dann grundsätzlich wie die Öffnung einer scharfkantigen Blende behandelt, ein Durchflußbeiwert  $\alpha = 0,64$  angenommen und gemäß Gl. (2.43) ein äquivalenter Ventilkoeffizient errechnet.

Als Druck vor der Drosselstelle  $p_M$  ist der an dieser Stelle höchste Wert, der physikalisch denkbar oder durch ein vorgeschaltetes Sicherungssystem determiniert ist, zu verwenden.

Erfolgt auf engstem Raum eine Mehrstufendrosselung, so weichen infolge veränderter Zustrom- und Abströmbedingungen auch die Kennwerte von den bekannten Einzelwerten ab. Detaillierte Angaben finden sich in /14/.

Zur späteren Bemessung des Sicherheitsventils muß auch die Dichte des Druckmediums auf der Nachdruckseite  $p_{ND}$  bekannt sein. Sie ist im allgemeinen nicht direkt bestimmbar. Ausgehend vom Ansatz gleichbleibender spezifischer Enthalpie vor ( $h_M$ ) und nach der Drosselstelle ( $h_{ND}$ ), der bei Vernachlässigung der Zu- und Abströmgeschwindigkeiten gilt, folgt somit

$$h_M = h_{ND} \quad (2.45)$$

Für das ideale Gas gilt  $h = c_p T$ , woraus sich sofort

$$t_M = t_{ND} \quad (2.46)$$

ergibt. Damit folgt in guter Näherung für **Luft-** und **Stickstoff** gemäß Gl. (A2)

$$\rho_D = \frac{10^6 p_{ND}}{290(t_M + 273)} \quad (2.47)$$

mit  $p_{ND}$  in MPa und  $t_M$  in °C.

Komplizierter gestaltet sich die Berechnung für das Druckmedium **Wasserdampf**. Zunächst ist die spezifische Enthalpie  $h_M$  vor der Drosselstelle zu ermitteln. Dies geschieht mittels Wasserdampf-tafel oder mit Hilfe der Gln. (A7) bzw. (A8). Im üblichen Anwendungsbereich der Heizungstechnik führt eine Drosselung des Wasserdampfes stets zu einem Zustand, der weiter von der Kurve des trocken gesättigten Dampfes entfernt ist, d.h., es tritt eine weitere Überhitzung ein, wobei allerdings die Dampftemperatur sinkt. Mittels Dampftafel muß man für  $p_{ND}$  den Zustand  $h_{ND} = h_M$  im Heißdampfgebiet aufsuchen und das spezifische Volumen  $v_{ND}$  ablesen, woraus

$$\rho_D = \frac{1}{v_{ND}} \quad (2.48)$$

folgt. Das Ablesen in der Dampftafel wird in der Regel mit einer Interpolation verbunden sein. Bei Anwenden der Approximationen Gl. (A7) und (A8) sind Iterationen erforderlich.

### Anmerkung

Setzt man bei der Drosselung von Wasserdampf wie bei idealen Gasen rechnerisch  $t_{ND} = t_M$ , so ergeben sich stets größere spezifische Volumina als real vorhanden. Somit folgen auch etwas größere Sicherheitsventilquerschnitte. Wird beispielsweise Sattedampf ( $p_M = 1 \text{ MPa}$ ;  $t_M = 180 \text{ °C}$ ;  $h_M = 2777 \text{ kJ/kg}$ ) auf  $p_{ND} = 0,2 \text{ MPa}$  entspannt, so betragen für  $h_{ND} = h_M$  die weiteren Zustandsgrößen  $t_{ND} = 153,9 \text{ °C}$  und  $v_{ND} = 0,9693 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Im Vergleich dazu folgt für konstante Temperatur  $t_{ND}^* = t_M = 180 \text{ °C}$  das spezifische Volumen  $v_{ND}^* = 1,033 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Die erforderlichen Sitzquerschnitte des Sicherheitsventils stehen in diesem Fall dann im Verhältnis 1:1,03.

Der Nachdruck  $p_{ND}$  ist eine Funktion des Einstelldruckes der Sicherheitsventile sowie der geometrischen Gegebenheiten und somit variantenabhängig zu ermitteln.

### Variante 1

Es gilt grundsätzlich

$$p_{ND} = p_{A,1} \quad (2.49)$$

Der mit Gl. (2.41) ermittelte Massestrom  $\dot{m}$  ist von SV1 abzuführen:

$$\dot{m}_{D,1} = \dot{m} \quad (2.50)$$

Die Dichte  $\rho_{D,1} = \rho_D$  folgt aus dem Rechenweg der Gl.n. (2.45) bis (2.48).

### Variante 2

Ist **keine Wasservorlage** vor SV2 vorhanden, d.h., befindet sich der Wasserstand  $H_W$  unterhalb der Anbindung von SV2, so gilt

$$p_{ND} = p_{A,2} \quad (2.51)$$

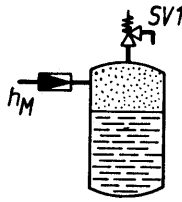
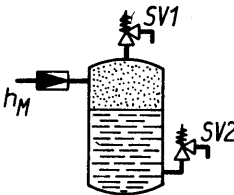
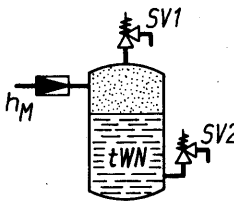
Der aus Gl. (2.41) folgende Massestrom  $\dot{m}$  entspricht somit dem Abblasestrom

$$\dot{m}_{D,2} = \dot{m} \quad (2.52)$$

Bei einer **Wasservorlage** stellt sich im Ansprechfall von SV2 hinter dem Druckminderer ein niedrigerer Druck ein, denn die hydrostatische Bilanz liefert

$$p_{ND} = p_{A,2} - g \rho_{WN} (H_W - H_2) \quad (2.53)$$

Tabelle 2.4 Lastannahmen bei Druckminderer-Zufluß (M)

| Schaltung / Variante                                                                             | Phase         | Abblasestrom                       | Dichte                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <br>$V = 1$   |               | $\dot{m}_{D1M}$                    | $\rho_{D1M} = \rho_D(t, p_{A,1})$                                     |
| <br>$V = 2$   | I 1)<br>II    | $\dot{m}_{W2M}$<br>$\dot{m}_{D2M}$ | $\rho_{W2M} = \rho_{WN}(t_{WN})$<br>$\rho_{D2M} = \rho_D(t, p_{A,2})$ |
| <br>$V = 3$   |               | $\dot{m}_{D1M}$                    | $\rho_{D1M} = \rho_D(t, p_{A,1})$                                     |
| <br>$V = 4$ | I 1)<br>II 2) | $\dot{m}_{W2M}$<br>$\dot{m}_{D1M}$ | $\rho_{W2M} = \rho_{WN}(t_{WN})$<br>$\rho_{D1M} = \rho_D(t, p_{A,1})$ |

1) Bei  $W=0$  entfällt Phase I.

2) Lastannahme nicht eindeutig  
 $t$  ist für  $h_M = \text{const}$  (konstante spezifische Enthalpie beim Drosselvorgang) zu bestimmen.

Der niedrigste Nachdruck, der den maximalen Massestrom durch den Druckminderer bewirkt, ergibt sich für  $H_W = H_M$  zu

$$p_{ND} = p_{A,2} - g \cdot \rho_{WN} (H_M - H_2). \quad (2.54)$$

Die Dichte  $\rho_{WN}$  ist zugehörig zur Wassertemperatur im Behälter  $t_{WN}$  zu ermitteln. Der aus Gl. (2.41) folgende Massestrom  $\dot{m}$  muß auf einen volumengleichen Wasserstrom nach Gl. (2.6) umgerechnet werden. Er beträgt:

$$\dot{m}_{W,2} = \dot{m} \frac{\rho_{WN}}{\rho_D}. \quad (2.55)$$

Die Dichte des Druckmediums  $\rho_D$  ergibt sich analog dem eingangs beschriebenen Verfahren (Gln. (2.45) bis (2.48)) unter Bezug auf den maximalen Nachdruck  $p_{ND}$ . Für die Dichte des abzuleitenden Wassers gilt  $\rho_{W,2} = \rho_{WN}$ .

### Variante 3

Da SV1 vor SV2 anspricht und das unkontrolliert zuströmende Druckmedium an der höchsten Stelle abgeführt wird, gelten für Variante 3 die gleichen Lastannahmen wie für Variante 1.

### Variante 4

Gemäß Abschnitt 2.1.1. - Prämissen - ist zuerst der Wasserstrom über SV2 abzuleiten. Die Lastermittlung wird in der Reihenfolge der Gln. (2.54), (2.41) und (2.55) vorgenommen (vgl. Variante 2 bei Wasservorlage).

In der zeitlich zweiten Phase erfolgt das Abblasen des Druckmediums über SV1 gemäß der Variante 1. Es gelten die Gln. (2.49) sowie (2.50) und die zugehörige Dichte  $\rho_{D,1}$ .

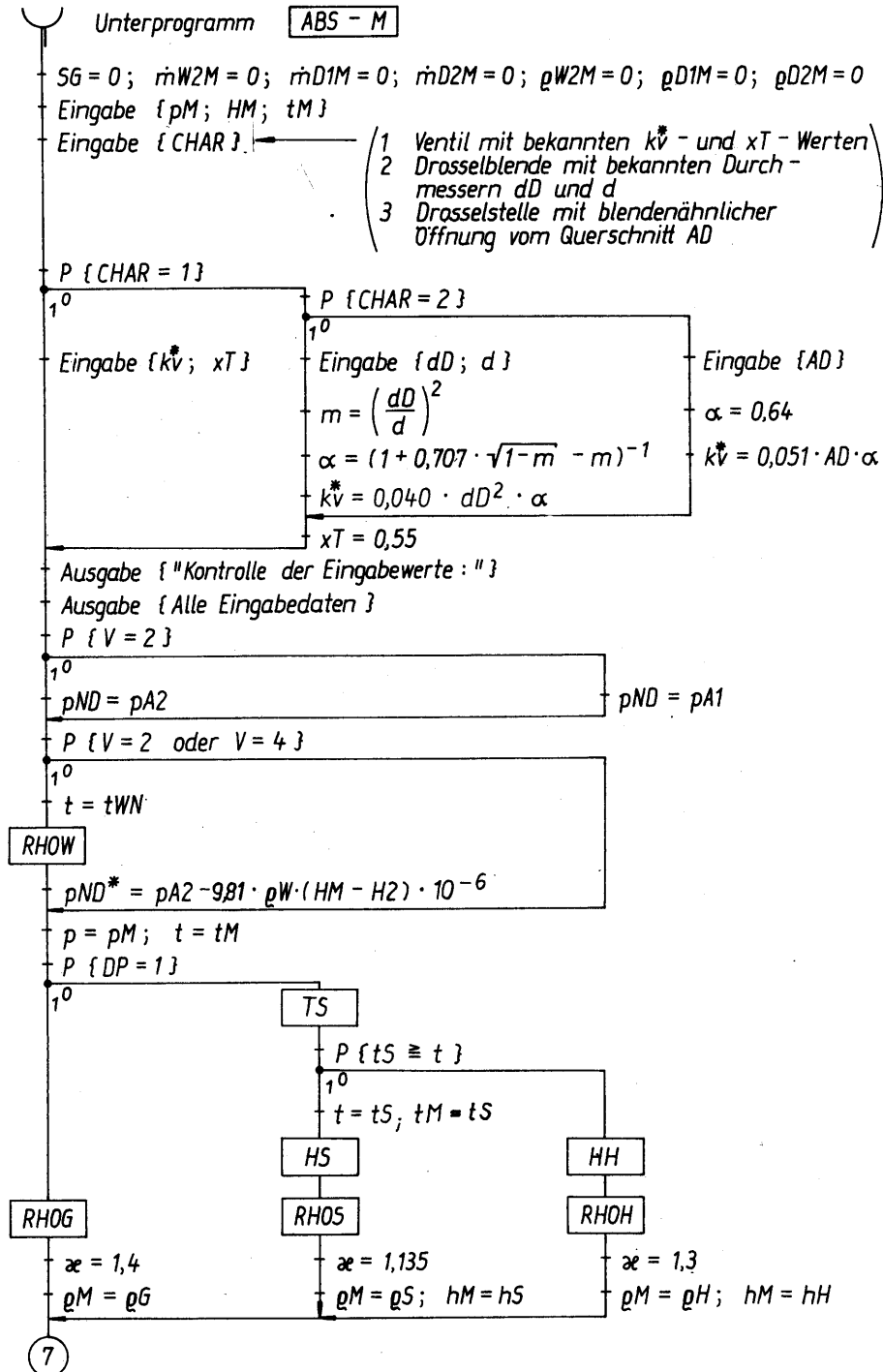
### Zusammenfassung

Die relevanten Lastfälle sind in Tabelle 2.4 zusammengestellt. Die Indizierung der Masseströme und Dichten stimmt mit den Bezeichnungen im nachfolgenden Unterprogramm überein.

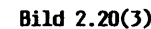
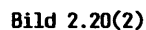
## 2.4.2. Unterprogramm

Der Datenflußplan ist im Bild 2.20 dargestellt. Die Eingabe CHAR charakterisiert die Art der Drosselstelle. CHAR=3 gestattet nur eine näherungsweise Berechnung.

Die Drücke nach dem Druckminderer  $p_{ND}$  werden variantenabhängig ermittelt. Die Dichten  $\rho_M$  und die spezifischen Enthalpien  $h_M$  vor dem Drosselorgan sind eindeutig bestimmbar.



**Bild 2.20** Flußplan des Unterprogramms **ABS-M** (Abblasestrom - Druckminderer) zur Ermittlung der Abblaseströme infolge unkontrollierter Druckmedienzufuhr bei Ausfall der Druckregelung



Der Zustand des Druckpolsters im Behälter wird im Fall der Dampfeinströmung ( $DP > 1$ ) iterativ unter Verwenden der Module **TS** und **HH** (siehe Anhang Gln. (A6) und (A8)) für  $hM = hH$  ermittelt. Dabei wird die Temperatur nach dem Drosselorgan zielgerichtet variiert. Nach Erfüllen der vorgegebenen Schranke ist die zu  $t$  und  $p$  gehörige Dichte  $\rho_H$  mittels **RHOH** (Gln. (A5) und (A4)) bestimmbar.

Bei Gasen ( $DP=1$ ) kann Modul **RHOG** (Gl. (A2)) direkt verwendet werden, da  $t \approx t_M$  bei der Drosselung gilt.

Die Belastung  $\dot{m}$  bei  $q_D$  wird im Fall  $V=2$  dem Sicherheitsventil SV2 als  $\dot{m}_{D2M}$  mit  $q_{D2M}$  und in den übrigen Fällen dem Sicherheitsventil SV1 als  $\dot{m}_{D1M}$  mit  $q_{D1M}$  zugewiesen. Bei  $V=2$  und  $V=4$  sind vor dem Abblasen des Druckmediums die volumengleichen Wasserströme über SV2 als  $\dot{m}_{W2M}$  mit  $q_{W2M}$  abzuleiten. Der eingangs beschriebene Rechengang ist deshalb ab Konnektor ⑦ für einen Nachdruck  $p_{ND}$ , der sich bei Wasservollfüllung und dem Ansprechdruck  $p_{A2}$  ergibt, zu wiederholen. Die Steuergröße hat den Wert  $SG=1$ .

#### Eingabewerte (Bezugnahme auf Bild 2.17 und Tabelle 2.4)

|         |         |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_M$   | MPa     | Druck vor dem Druckminderer                                                                                                                                                                                                                                 |
| $H_M$   | m       | Höhe des Armatureneintritts über dem tiefsten Punkt des Behälterdruckraumes oder der gewählten Bezugsebene                                                                                                                                                  |
| $t_M$   | °C      | Eintrittstemperatur des Druckmedienstromes                                                                                                                                                                                                                  |
| CHAR    | -       | Charakteristik des Drosselorgans<br>CHAR=1 Drosselventil mit bekanntem $k_V^*$ - und $x_T$ -Wert<br>CHAR=2 Drosselblende mit bekannter Geometrie<br>CHAR=3 Drosselstelle mit blendenähnlicher Öffnung und bekanntem Querschnitt (näherungsweise Berechnung) |
| $k_V^*$ | $m^3/h$ | Ventilkoeffizient des vollgeöffneten Druckminderers einschließlich positiver Fertigungstoleranz (z.B. $k_V^* = 1,1 k_{Vs}^*$ ) (nur bei CHAR=1)                                                                                                             |
| $x_T$   | -       | Modifiziertes kritisches Differenzdruckverhältnis (Herstellerangabe; Überschlagswerte siehe Abschnitt 2.4.1.) (nur bei CHAR=1)                                                                                                                              |
| $d_D$   | mm      | Blendenöffnungsdurchmesser (nur bei CHAR=2)                                                                                                                                                                                                                 |
| $d$     | mm      | Rohrinnendurchmesser (nur bei CHAR=2)                                                                                                                                                                                                                       |
| $A$     | $mm^2$  | Drosselquerschnitt (nur bei CHAR=3)                                                                                                                                                                                                                         |

### 2.4.3. Beispiel

Für die im Bild 2.21 gezeigte Schaltung sind für die Absicherungsvarianten

$$V=1: p_{A,1} = 0,850 \text{ MPa}$$

$$V=4: p_{A,1} = 0,878 \text{ MPa}; p_{A,2} = 0,798 \text{ MPa}$$

die Abblaseströme zu ermitteln.

Bei Normalbetrieb wird Stickstoff aufgelastet. Er strömt über eine zweistufige Reduziereinrichtung dem Behälter zu, wobei nach der ersten Stufe eine Berstscheibe den

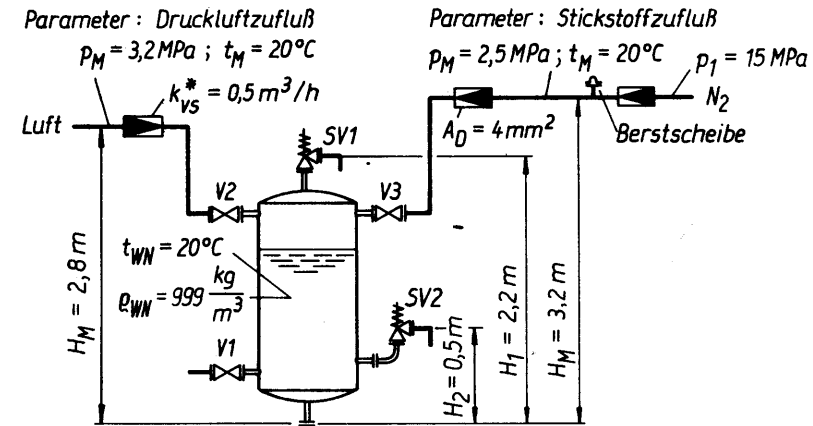


Bild 2.21 Geometrische und strömungstechnische Gegebenheiten der im Beispiel 2.4.3. betrachteten Anlage

Druck auf 2,5 MPa begrenzt. Dieser Druck gilt als Vordruck für den zweiten Druckminderer, von dem lediglich sein größter freiwerdender Drosselquerschnitt  $A_D$  bekannt ist.

Treten Schwierigkeiten bei der Stickstoffversorgung auf, so wird als Notdruckhaltesystem Luft von einem Druckluftspeicher über ein Reduzierventil mit bekanntem  $k_{Vs}^*$ -Wert nachgespeist. Die Fertigungstoleranz betrage  $\pm 12\%$ . Weiterhin gelte  $x_T = 0,72$ .

#### Lösung

Für die Variante 1 gilt der Nachdruck gemäß Gl. (2.49)

$$p_{ND} = 0,850 \text{ MPa.}$$

Da die Temperaturen für beide Medien (Stickstoff und Luft) gleich sind und nach Gl. (2.47) mit einem Mittelwert für die Gaskonstante gerechnet wird, folgt

$$\rho_D = \frac{10^6 \cdot 0,850}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 10,004 \text{ kg/m}^3.$$

Die weiteren Berechnungen erfolgen getrennt.

#### Stickstoffzufluß

Die Dichte vor dem Drosselorgan ergibt sich nach Gl. (A2) zu

$$\rho_M = \frac{10^6 \cdot 2,5}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 29,422 \text{ kg/m}^3.$$

Der Druckminderer in der Stickstoffleitung ist nur durch den Drosselquerschnitt quantifiziert. Gemäß Abschnitt 2.4.1. sollten dann zugehörige  $\alpha = 0,64$  und  $x_T = 0,55$  angenommen werden.

Nach Gl. (2.42) ergibt sich das Differenzdruckverhältnis

$$x = \min \left\{ \frac{2,5 - 0,850}{2,5} = 0,66 ; \frac{1,4}{1,4} \cdot 0,55 = 0,55 \right\} = 0,55.$$

Da  $x = x_{\max}$  gilt, handelt es sich hierbei um eine überkritische Entspannung. Der  $k_V^*$ -Wert ist gemäß Gl. (2.43) zu bilden:

$$k_V^* = \frac{\sqrt{2}}{28} \cdot 4 \cdot 0,64 = 0,129 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Schließlich liefert Gl. (2.41) den Massezufluß

$$\dot{m} = 0,028 \cdot 0,129 \cdot \left( 1 - \frac{0,55}{2,143 \cdot 1,4 \cdot 0,55} \right) \cdot \sqrt{0,55 \cdot 2,5 \cdot 29,422} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = 0,0153 \text{ kg/s}.$$

Damit gilt für die Belastung des SV1:

$$\dot{m}_{D,1} = 0,0153 \text{ kg/s bei } \rho_{D,1} = 10 \text{ kg/m}^3.$$

#### Druckluftzufluß

In analoger Weise folgen, bezogen auf den Druckminderer in der Druckluftleitung:

Gl. (A2)

$$\rho_M = \frac{10^6 \cdot 3,2}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 37,660 \text{ kg/m}^3$$

Gl. (2.42)

$$x = \min \left\{ \frac{3,2 - 0,850}{3,2} = 0,734 ; \frac{1,4}{1,4} \cdot 0,72 = 0,72 \right\} = 0,72 \quad (\text{überkritische Entspannung})$$

Maximaler Ventilkoeffizient

$$k_V^* = 1,12 \quad k_{VS}^* = 1,12 \cdot 0,5 \text{ m}^3/\text{h} = 0,56 \text{ m}^3/\text{h}$$

Gl. (2.41)

$$\dot{m} = 0,028 \cdot 0,56 \cdot \left( 1 - \frac{0,72}{2,143 \cdot 1,4 \cdot 0,72} \right) \cdot \sqrt{0,72 \cdot 3,2 \cdot 37,660} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = 0,0974 \text{ kg/s}.$$

Damit folgt die Belastung für SV1:

$$\dot{m}_{D,1} = 0,0974 \text{ kg/s bei } \rho_{D,1} = 10 \text{ kg/m}^3.$$

Bei **Variante 4** sind die Belastungen des Sicherheitsventils SV1 analog wie bei Variante 1 zu ermitteln. Der Ansprechdruck  $p_{A,1} = 0,878 \text{ MPa}$  bewirkt zwar eine veränderte Dichte im Behälter

$$\rho_D = \frac{10^6 \cdot 0,878}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 10,333 \text{ kg/m}^3,$$

die Masseströme bleiben aber unverändert, da die Druckgefälle weiterhin überkritisch (vgl. Gl. (2.42)) sind.

Die Belastung für SV2 berechnet sich in folgenden Schritten:

#### Stickstoffzufluß

Gl. (2.54)

$$p_{ND} = (0,798 - 9,81 \cdot 999 \cdot (3,2 - 0,5) \cdot 10^{-6}) \text{ MPa} = 0,7715 \text{ MPa}$$

Gl. (2.47)

$$\rho_D = \frac{10^6 \cdot 0,7715}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9,080 \text{ kg/m}^3$$

Gl. (2.42)

$$x = 0,55 \quad (\text{überkritisches Druckgefälle})$$

Gl. (2.41)

$$\dot{m} = 0,0153 \text{ kg/s}.$$

Gl. (2.55) liefert den abzuführenden Wasserstrom:

$$\dot{m}_{W,2} = 0,0153 \frac{999}{9,080} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,683 \text{ kg/s bei } \rho_{W,2} = 999 \text{ kg/m}^3.$$

#### Druckluftzufluß

Gl. (2.54)

$$p_{ND} = (0,798 - 9,81 \cdot 999 \cdot (2,8 - 0,5) \cdot 10^{-6}) \text{ MPa} = 0,7755 \text{ MPa}$$

Gl. (2.47)

$$\rho_D = \frac{10^6 \cdot 0,7755}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9,127 \text{ kg/m}^3$$

Gl. (2.42)

$$x = 0,72 \quad (\text{überkritisches Druckgefälle})$$

Gl. (2.41)

$$\dot{m} = 0,0974 \text{ kg/s}$$

Gl. (2.55) liefert den abzuführenden Wasserstrom:

$$\dot{m}_{W,2} = 0,0974 \frac{999}{9,127} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 10,661 \text{ kg/s bei } \rho_{W,2} = 999 \text{ kg/m}^3.$$

Die mittels Rechenprogramms (Bild 2.20) ermittelten Ergebnisse sind den nachfolgenden Protokollen zu entnehmen:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |                  |
| Absicherungsvariante                                                   | V = 1            |
| Steuergröße                                                            | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 = 0.8500 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 = 2.200 m     |
| Behälterfüllung                                                        | W = 0.5          |
| Art des Druckmediums                                                   | DP = 1           |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb                               |                  |
| Wasser                                                                 | tWN = 20 °C      |
| Druckmedium                                                            | tDN = 20 °C      |

| LF:ABS-M Unkontrollierter Druckmedienzufluß über einen Druckminderer |                                   |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                   |                                   |
| Druck vor dem Druckminderer                                          | pM = 2.500000 MPa                 |
| Höhe des Armatureneintritts                                          | HM = 3.200 m                      |
| Temperatur des zuströmenden Druckmediums                             | tM = 20 °C                        |
| Charakteristik des Drosselorgans                                     | CHAR = 3                          |
| Drosselquerschnitt                                                   | AD = 4.0 mm <sup>2</sup>          |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                   |                                   |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                                     | mDIM = 0.0155 kg/s                |
| Dichte                                                               | RHODIM = 10.004 kg/m <sup>3</sup> |

| LF:ABS-M Unkontrollierter Druckmedienzufluß über einen Druckminderer |                                   |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                   |                                   |
| Druck vor dem Druckminderer                                          | pM = 3.200000 MPa                 |
| Höhe des Armatureneintritts                                          | HM = 2.800 m                      |
| Temperatur des zuströmenden Druckmediums                             | tM = 20 °C                        |
| Charakteristik des Drosselorgans                                     | CHAR = 1                          |
| Ventilkoeffizient mit Plustoleranz                                   | kv† = 0.560 m <sup>3</sup> /h     |
| Modif. kritisches Differenzdruckverhältnis                           | xT = 0.72                         |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                   |                                   |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                                     | mDIM = 0.0974 kg/s                |
| Dichte                                                               | RHODIM = 10.004 kg/m <sup>3</sup> |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |                  |
| Absicherungsvariante                                                   | V = 4            |
| Steuergröße                                                            | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 = 0.8780 MPa |
| Gegebener Ansprechdruck für SV2                                        | pA2 = 0.7980 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 = 2.200 m     |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2                                        | H2 = 0.500 m     |

|                                          |               |
|------------------------------------------|---------------|
| Behälterfüllung                          | W = 0.5       |
| Art des Druckmediums                     | DP = 1        |
| öffnungsverhältnis                       | Omega = 1.10  |
| Minimale Wassertemperatur                | tmin = 10 °C  |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb |               |
| Wasser                                   | tWN = 20 °C   |
| Druckmedium                              | tDN = 20 °C   |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                       |               |
| Verhältnis der Ansprechdrücke            | Omega† = 1.10 |

| LF:ABS-M Unkontrollierter Druckmedienzufluß über einen Druckminderer |                                   |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                   |                                   |
| Druck vor dem Druckminderer                                          | pM = 2.500000 MPa                 |
| Höhe des Armatureneintritts                                          | HM = 3.200 m                      |
| Temperatur des zuströmenden Druckmediums                             | tM = 20 °C                        |
| Charakteristik des Drosselorgans                                     | CHAR = 3                          |
| Drosselquerschnitt                                                   | AD = 4.0 mm <sup>2</sup>          |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                   |                                   |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                                     | mDIM = 0.0155 kg/s                |
| Dichte                                                               | RHODIM = 10.333 kg/m <sup>3</sup> |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                                     | mW2M = 1.7041 kg/s                |
| Dichte                                                               | RHOW2M = 998.2 kg/m <sup>3</sup>  |

| LF:ABS-M Unkontrollierter Druckmedienzufluß über einen Druckminderer |                                   |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                   |                                   |
| Druck vor dem Druckminderer                                          | pM = 3.200000 MPa                 |
| Höhe des Armatureneintritts                                          | HM = 2.800 m                      |
| Temperatur des zuströmenden Druckmediums                             | tM = 20 °C                        |
| Charakteristik des Drosselorgans                                     | CHAR = 1                          |
| Ventilkoeffizient mit Plustoleranz                                   | kv† = 0.560 m <sup>3</sup> /h     |
| Modif. kritisches Differenzdruckverhältnis                           | xT = 0.72                         |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                   |                                   |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                                     | mDIM = 0.0974 kg/s                |
| Dichte                                                               | RHODIM = 10.333 kg/m <sup>3</sup> |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                                     | mW2M = 10.6502 kg/s               |
| Dichte                                                               | RHOW2M = 998.2 kg/m <sup>3</sup>  |

## 2.5. Zuströmung von Wasser durch Rohrbruch

Reißt eine im Behälter verlegte Rohrleitung (Bild 2.22) - beispielsweise eine Heizschlange -, so strömt Wasser aus dieser aus, wenn der Druck im Rohr größer als im Behälter ist. Je nach den gegebenen Druckverhältnissen kann dies das Ansprechen eines der Sicherheitsventile bewirken.

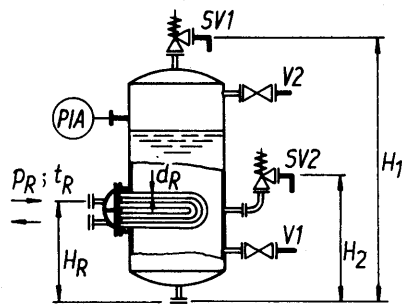


Bild 2.22 Zuströmung von Wasser bei Bruch eines wasserdurchströmten Rohrs

Index des Lastfalles: R

Charakteristische Eingangsgrößen:

$p_R$  Druck in der Rohrschlange am Eintritt  
 $H_R$  Höhe der Rohrschlange am Eintritt  
 $t_R$  Temperatur des in der Rohrschlange fließenden Wassers.

### 2.5.1. Algorithmus

In Analogie zur Durchströmung eines Stellventil-Querschnittes kann auch im Falle des Rohrbruchs auf Gl. (2.26) bezogen werden. Dabei ist für den Ventilkoeffizienten die Gl. (2.43) zu substituieren. Es gilt zusammengefaßt:

$$\dot{m} = \sqrt{2} \cdot 10^{-3} A_D \alpha \sqrt{\rho_W (p_R - p_{BD})} \quad \text{in kg/s} \quad (2.56)$$

mit

|           |                   |                                       |
|-----------|-------------------|---------------------------------------|
| $\dot{m}$ | kg/s              | Wasserstrom                           |
| $A_D$     | mm <sup>2</sup>   | Fläche der Bruchstelle                |
| $\alpha$  | -                 | Ausflußbeiwert                        |
| $\rho_W$  | kg/m <sup>3</sup> | Dichte des Wassers bei $t_R$          |
| $p_R$     | MPa               | Druck im Rohr                         |
| $p_{BD}$  | MPa               | Behälterdruck an der Rohrbruchstelle. |

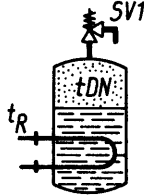
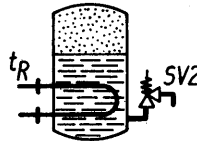
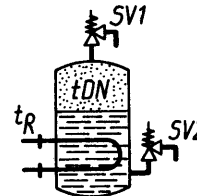
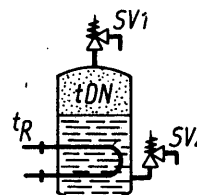
Die Annahme der Größen  $A_D$  und  $\alpha$  ist unsicher. Nach /15/ sind zwei freie Rohrquerschnitte für  $A_D$  anzusetzen, da von beiden Seiten der Rohrbruchstelle Wasser ausfließen kann. Weiter ist der Ausflußbeiwert - oft auch "Ausflußziffer" genannt - mit  $\alpha = 0,5$  angegeben. Somit gilt für

$$A_D \alpha = 2 \pi \frac{d^2}{4} \cdot 0,5 = \pi \frac{d^2}{4} \quad \text{in mm}^2 \quad (2.57)$$

mit

d | mm | Rohrrinnendurchmesser.

Tabelle 2.5 Lastannahmen bei Wasserzufluß infolge Rohrbruchs (R)

| Schaltung / Variante                                                                           | Phase                                                                                        | Abblasestrom                                                                  | Dichte                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>V = 1   | I 1)                                                                                         | $\dot{m}_{D1R}$                                                               | $\rho_{D1R} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                               |
|                                                                                                | II                                                                                           | $\dot{m}_{W1R}$                                                               | $\rho_{W1R} = \rho_W(t_R)$                                                                              |
|                                                                                                | Last bei <b>Teilverdampfung</b> :                                                            |                                                                               |                                                                                                         |
|                                                                                                | I 1)                                                                                         | $\dot{m}_{D1R}$                                                               | $\rho_{D1R} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                               |
| <br>V = 2   | II                                                                                           | $\left[ \begin{array}{l} \dot{m}_{WD1R} \\ \dot{m}_{W1R} \end{array} \right]$ | $\left[ \begin{array}{l} \rho_{WD1R} = \rho_S(p_{A,1}) \\ \rho_{W1R} = \rho_W(t_S) \end{array} \right]$ |
|                                                                                                | Bei <b>Teilverdampfung</b> ist diese Anordnung des Sicherheitsventils <b>nicht zulässig!</b> |                                                                               |                                                                                                         |
|                                                                                                |                                                                                              |                                                                               |                                                                                                         |
|                                                                                                |                                                                                              |                                                                               |                                                                                                         |
| <br>V = 3   | I 1)                                                                                         | $\dot{m}_{D1R}$                                                               | $\rho_{D1R} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                               |
|                                                                                                | II 2)                                                                                        | $\dot{m}_{W2R}$                                                               | $\rho_{W2R} = \rho_W(t_R)$                                                                              |
|                                                                                                | Last bei <b>Teilverdampfung</b> :                                                            |                                                                               |                                                                                                         |
|                                                                                                | I 1)                                                                                         | $\dot{m}_{D1R}$                                                               | $\rho_{D1R} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                               |
| <br>V = 4 | II                                                                                           | $\left[ \begin{array}{l} \dot{m}_{WD1R} \\ \dot{m}_{W1R} \end{array} \right]$ | $\left[ \begin{array}{l} \rho_{WD1R} = \rho_S(p_{A,1}) \\ \rho_{W1R} = \rho_W(t_S) \end{array} \right]$ |
|                                                                                                | Last bei <b>Teilverdampfung</b> :                                                            |                                                                               |                                                                                                         |
|                                                                                                | I 1) 2)                                                                                      | $\dot{m}_{D1R}$                                                               | $\rho_{D1R} = \rho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$                                                               |
|                                                                                                | II 2)                                                                                        | $\left[ \begin{array}{l} \dot{m}_{WD1R} \\ \dot{m}_{W1R} \end{array} \right]$ | $\left[ \begin{array}{l} \rho_{WD1R} = \rho_S(p_{A,1}) \\ \rho_{W1R} = \rho_W(t_S) \end{array} \right]$ |

1) Bei W=1 entfällt Phase I. 2) Lastannahme nicht eindeutig

[ ] Beide Masseströme gehören zu einem Lastfall.

$t_S$  Siedetemperatur des Wassers beim Abblasedruck

Bei dem so definierten Produkt  $A_D \propto$  handelt es sich um eine Festlegung, denn es gibt natürlich keine "allgemeingültige" Geometrie für einen Rohrreißer.

Der Behälterdruck  $p_{BD}$  in unmittelbarer Nähe der Rohrbruchstelle ist variantenabhängig zu ermitteln. Es gelten für  $p_{BD}$  die analogen Zusammenhänge wie für  $p_{ND}$  im Abschnitt 2.3.1. Dabei ist  $\varrho_W$  für die Temperatur  $t_R$  zu bilden, und anstelle von  $H_V$  muß  $H_R$  verwendet werden.

Zusammenfassend sind die Lastzuordnungen in Tabelle 2.5 angegeben.

## 2.5.2. Unterprogramm

Der Datenflußplan ist im Bild 2.23 dargestellt. Der Aufbau entspricht völlig der im Bild 2.15 gezeigten Form. Es sind lediglich die Indizierung und die Berechnungsgleichung für  $\dot{m}$  geändert. Letztere ergibt sich durch Substitution von Gl. (2.57) in Gl. (2.56).

**Eingabewerte** (Bezugnehmend auf Bild 2.22 und Tabelle 2.5)

|       |     |                                                                                                                 |
|-------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_R$ | MPa | Druck am Eintritt in die Rohrschlange                                                                           |
| $H_R$ | m   | Höhe des Rohrschlängen-Eintritts über dem tiefsten Punkt des Behälterdruckraumes oder der gewählten Bezugsebene |
| $t_R$ | °C  | Eintrittstemperatur des Fluidstromes                                                                            |
| $d_R$ | mm  | Rohrinnendurchmesser der Rohrschlange                                                                           |

## 2.5.3. Beispiel

Für die im Bild 2.24 gezeigte Wärmeübertragerschaltung sind die Abblaseströme im Falle eines Rohrbruchs zu ermitteln. Es soll dabei die Absicherungsvariante

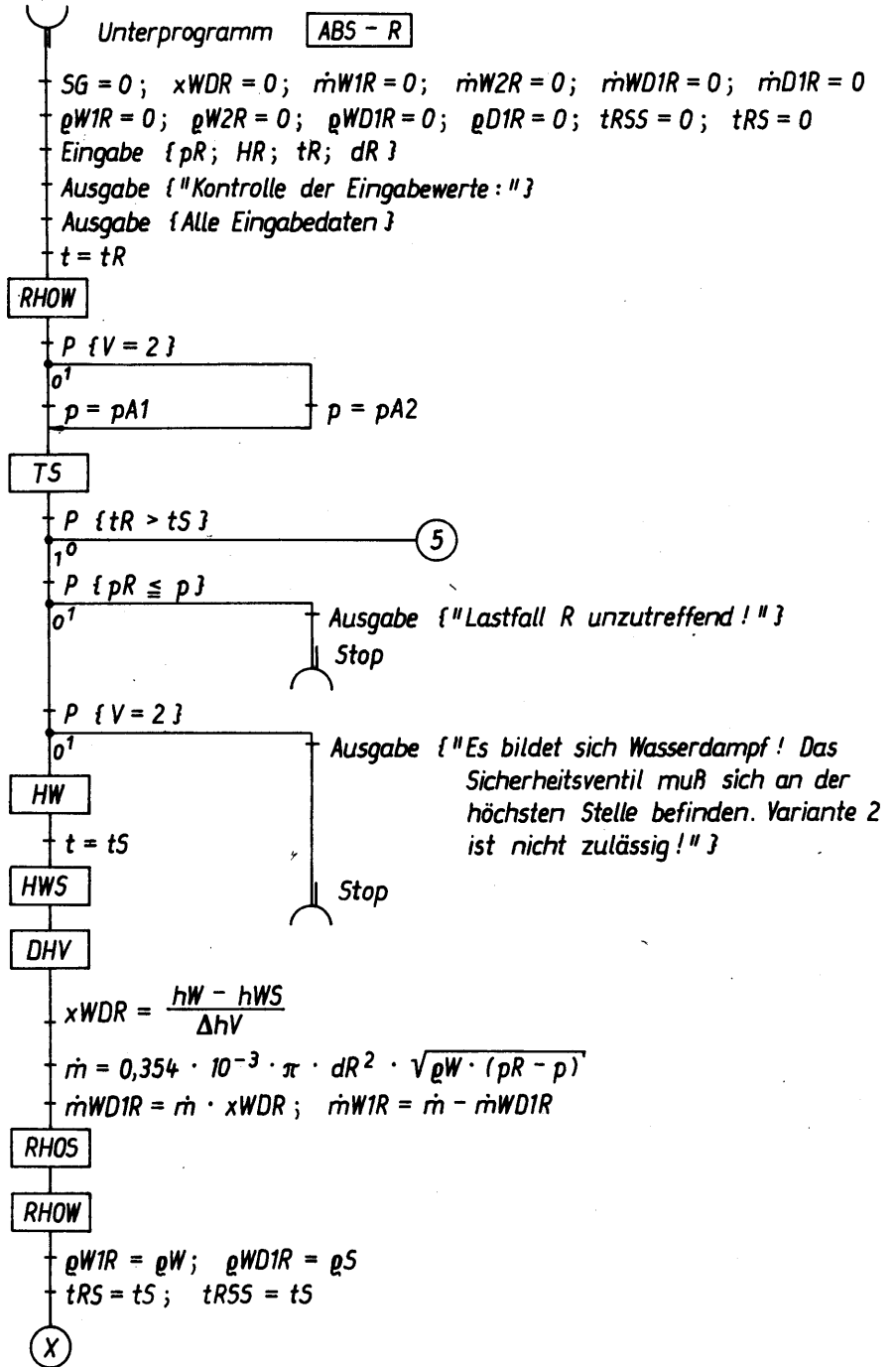
V=1:  $p_{A,1} = 0,850$  MPa

untersucht werden. Die weiteren Parameter betragen:  $p_R = 1,7$  MPa;  $t_R = 190$  °C;  $d_R = 0,014$  m.

## Lösung

Für den Rohrreißer gilt nach Gl. (2.57)

$$A_D \propto \pi \frac{14^2}{4} = 154 \text{ mm}^2.$$



**Bild 2.23** Flußplan des Unterprogramms **ABS-R** (Abblasestrom - Rohrbruch) zur Ermittlung der Abblaseströme bei Bruch eines wasserdurchströmten Rohres

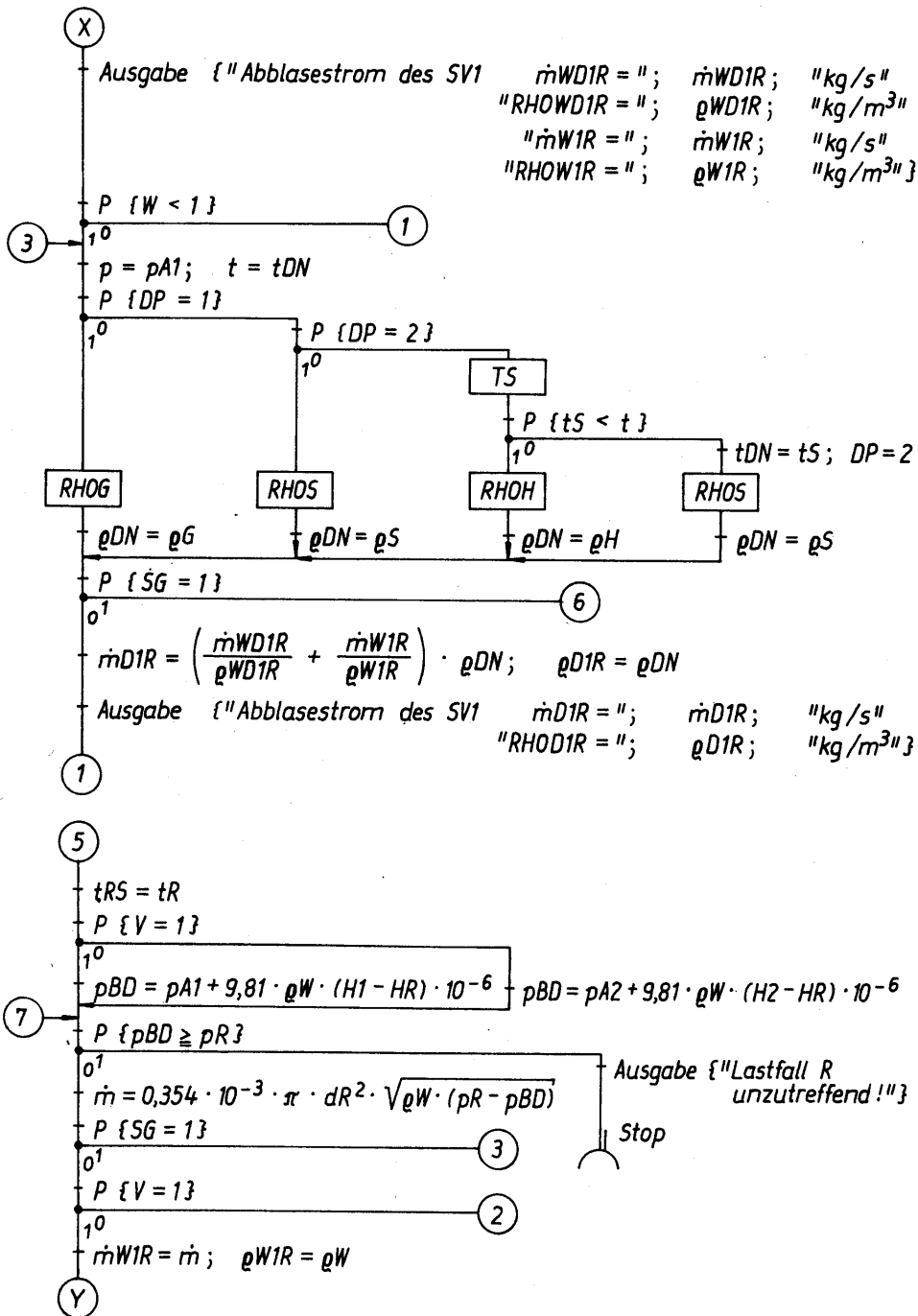


Bild 2.23(2)

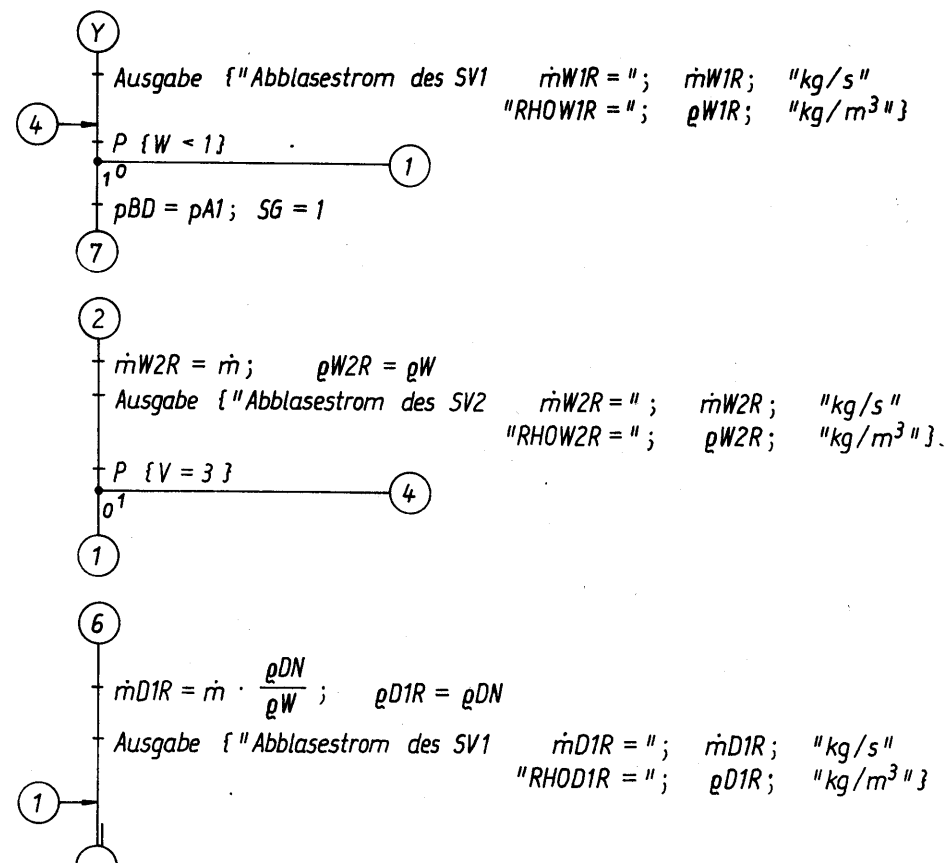


Bild 2.23(3)

Die Dichte des ausströmenden Wassers beträgt für  $t_R = 190^\circ\text{C}$  nach Gl. (A1) oder entsprechenden Tabellen

$$\rho_W = 876 \text{ kg/m}^3.$$

Da zu  $t_R = 190^\circ\text{C}$  ein Siededruck von 1,255 MPa gehört, die Absicherung des Wärmeübertragers aber bei  $p_{A,1} = 0,850 \text{ MPa}$  liegt, wird das aus der Rohrbruchstelle austretende Wasser teilweise verdampfen. Die Berechnung kann dabei in Analogie zu Abschnitt 2.3.1. erfolgen. Anstelle des dort definierten Begriffs Nachdruck  $p_{ND}$  wird nun aber der Behälterdruck  $p_{BD}$  verwendet. Damit folgt nach Gl. (2.35)

$$p_{BD} = 0,850 \text{ MPa}.$$

Die Höhen der Anschlußstutzen und des Sicherheitsventils sind somit für diesen Lastfall bedeutungslos.

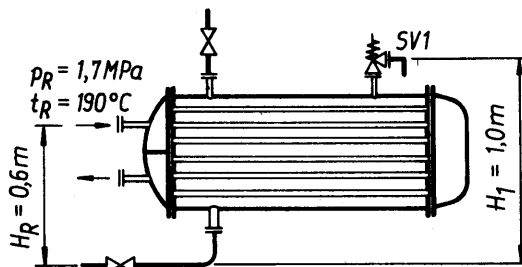


Bild 2.24 Geometrische Gegebenheiten und Eintrittsparameter des im Beispiel 2.5.3. betrachteten Wärmeübertragers

Schließlich liefert Gl. (2.56)

$$\dot{m} = \sqrt{2} \cdot 10^{-3} \cdot 154 \cdot \sqrt{876 \cdot (1,7 - 0,850)} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 5,94 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Um die daraus entstehenden Dampf- und Wasseranteile zu bestimmen, müssen zunächst die zur Auswertung der Gl. (2.11) benötigten Enthalpien bestimmt werden. Zugehörig zu  $p_{RD}$  gelten die Werte

$$h_{WS} = 732 \text{ kJ/kg und } \Delta h_V = 2038,8 \text{ kJ/kg.}$$

Sie sind direkt den Wasserdampf- und Wasserenthalten zu entnehmen oder in der Reihenfolge der Gln. (A6), (A10) und (A11) zu ermitteln. Die Enthalpie des in das Rohrregister eintretenden Wassers beträgt gemäß Dampftafel oder Gl. (A9)

$$h_W = 807,7 \text{ kJ/kg.}$$

Der Dampfgehalt des entspannten Massestromes  $\dot{m}$  berechnet sich nach Gl. (2.11):

$$x_{WD} = \frac{807,7 - 732}{2038,8} = 0,037.$$

Damit ergeben sich nach Gln. (2.36) und (2.37) die Teilströme:

$$\dot{m}_{WD,1} = 0,037 \cdot 5,94 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,22 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{W,1} = (5,94 - 0,22) \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 5,72 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Die zugehörigen Dichten betragen:

$$\rho_{WD,1} = 4,41 \text{ kg/m}^3; \quad \rho_{W,1} = 894 \text{ kg/m}^3.$$

Das Ergebnis des nach Bild 2.23 erstellten Rechenprogramms liefert das nachfolgende Protokoll:

| SICHERHEITSVENTILE Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|--------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>               |                  |
| Absicherungsvariante                             | V = 1            |
| Steuergröße                                      | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                  | pA1 = 0.8500 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                  | H1 = 1.000 m     |
| Behälterfüllung                                  | W = 1.0          |

| LF:ABS-R Unkontrollierter Wasserzufluß infolge Rohrreißer |                        |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                        |                        |
| Druck am Eintritt in die Rohrschlange                     | pR = 1.700000 MPa      |
| Höhe des Rohrschlängeneintritts                           | HR = 0.600 m           |
| Temperatur des zuströmenden Wassers                       | tR = 190 °C            |
| Rohrinnendurchmesser der Rohrschlange                     | dR = 14.0 mm           |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                        |                        |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                          | mW1R = 5.7291 kg/s     |
| Dichte                                                    | RHOW1R = 894.1 kg/m^3  |
| Massestrom                                                | mWD1R = 0.2189 kg/s    |
| Dichte                                                    | RHOWD1R = 4.412 kg/m^3 |

## 2.6. Zuströmung von Dampf durch Rohrbruch

Dieser Lastfall kann bei mit Hochdruckdampf beheizten Wärmeübertragern (Bild 2.25) eintreten. Zur Absicherung muß das Sicherheitsventil stets an der höchsten Stelle angeordnet sein (SV1).

Index des Lastfalles: RD

Charakteristische Eingangsgrößen:

$p_{RD}$  Druck im Rohrregister  
 $t_{RD}$  Temperatur des im Rohrregister strömenden Dampfes.

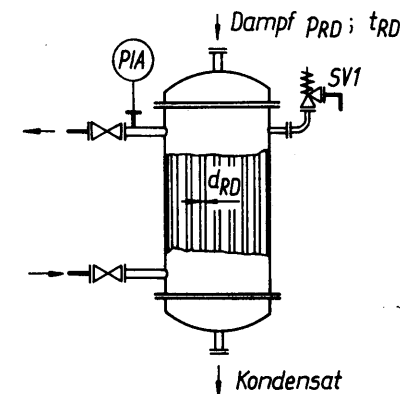


Bild 2.25 Zuströmung von Dampf bei Bruch eines dampfdurchströmten Rohres

### 2.6.1. Algorithmus

Die Ermittlung der Lastannahme erfolgt in Analogie zum Abschnitt 2.4.1. Die Substitution der Gl. (2.43) in Gl. (2.41) liefert den Massestrom

$$\dot{m} = \sqrt{2} \cdot 10^{-3} A_D \alpha \left(1 - \frac{x}{2,143 \alpha x_T}\right) \sqrt{x p_{RD} \rho_{RD}} \quad \text{in kg/s} \quad (2.58)$$

mit

|           |                 |                          |              |
|-----------|-----------------|--------------------------|--------------|
| $\dot{m}$ | kg/s            | Dampfstrom               | } Gl. (2.57) |
| $A_D$     | mm <sup>2</sup> | Fläche der Bruchstelle   |              |
| $\alpha$  | -               | Ausflußbeiwert           |              |
| $x$       | -               | Differenzdruckverhältnis |              |

$$x = \text{Min} \left\{ \frac{p_{RD} - p_{BD}}{p_{RD}}; \frac{\alpha}{1,4} x_T \right\} \quad (2.59)$$

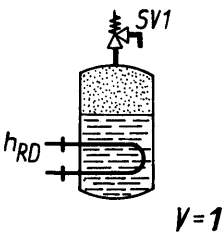
|             |                   |                                                                                  |
|-------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$    | -                 | Isentropenexponent<br>(Sattdampf: $\alpha = 1,135$ ; Heißdampf: $\alpha = 1,3$ ) |
| $x_T$       | -                 | Modifiziertes Differenzdruckverhältnis ( $x_T \approx 0,55$ )                    |
| $p_{RD}$    | MPa               | Druck im Dampfrohr                                                               |
| $\rho_{RD}$ | kg/m <sup>3</sup> | Dichte im Dampfrohr.                                                             |

Näherungsweise wird Gl. (2.57) auch für diesen Lastfall als gültig angenommen und in Ermangelung genauerer Erkenntnisse  $x_T = 0,55$  gesetzt. Für den Behälterdruck gilt

$$p_{BD} = p_{A,1} \quad (2.60)$$

Dieser Zusammenhang ist allgemeingültig, da nur Variante 1 eine Absicherung zuläßt.

**Tabelle 2.6** Lastannahme bei Dampfzufluß infolge Rohrbruchs (RD)

| Schaltung / Variante                                                               | Phase | Abblasestrom      | Dichte                              |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------|-------------------------------------|
|  |       | $\dot{m}_{WD1RD}$ | $\rho_{WD1RD} = \rho_H(t; p_{A,1})$ |

$t$  ist für  $h_{RD} = \text{const}$  (konstante spezifische Enthalpie beim Ausströmvorgang) zu bestimmen.

Die spezifische Enthalpie des im Rohr strömenden Dampfes  $h_{RD}$  bleibt bei der Entspannung auf Behälterdruck konstant. Unter dieser Voraussetzung kann das spezifische Volumen  $v_{BD}$  bestimmt und daraus wiederum die Dichte des im Behälter befindlichen Wasserdampfes

$$\rho_{WD} = \frac{1}{v_{BD}} \quad (2.61)$$

ermittelt werden (siehe Abschnitt 2.4.1. und nachfolgendes Beispiel).

### 2.6.2. Unterprogramm

Der Datenflußplan ist im Bild 2.26 dargestellt. Bezugnehmend auf den Dampfdruck im Rohrregister  $p_{RD}$  wird zunächst mit dem Modul **TS** die zugehörige Siedetemperatur  $t_S$  bestimmt. Gilt  $t_{RD} > t_S$ , so handelt es sich um Heißdampf, ansonsten um Sattdampf. Wurde  $t_{RD} < t_S$  eingegeben, so wird dies bei der weiteren Betrachtung ignoriert und die zu  $p_{RD}$  gehörige Sättigungstemperatur verbindlich angenommen. Je nach der ermittelten Dampfart (Heißdampf oder Sattdampf) erfolgt die Zuordnung des Isentropenexponenten  $\alpha$ , der spezifischen Enthalpie  $h_{RD}$  und der Dichte  $\rho_{RD}$ . Anschließend wird das Differenzdruckverhältnis nach Gl. (2.59) bestimmt und der Massestrom, der bei Rohrbruch in den Mantelraum fließt, ermittelt. Dieser Massestrom  $\dot{m}_{WD1RD}$  ist dann vom Sicherheitsventil SV1 abzuführen.

Um die zugehörige Dichte  $\rho_{WD1RD}$  mittels der Gln. (A5) und (A4) berechnen zu können, muß vorher die Dampftemperatur im Mantelraum, d.h. nach der Entspannung, bestimmt werden. Sie wird für eine Isenthalpe  $h_{RD} = h_H(p_{BD}, t)$  iterativ ermittelt.

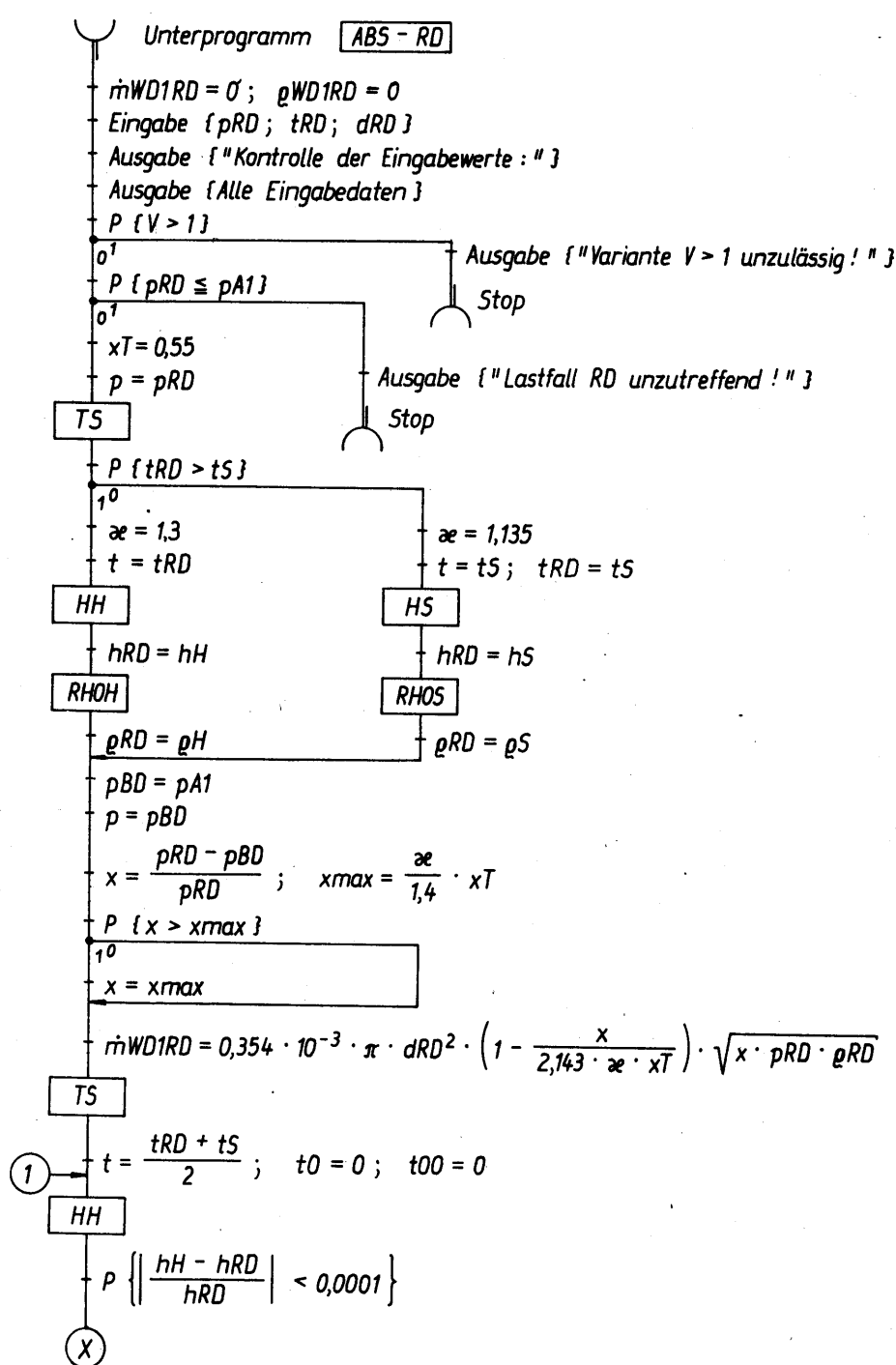
**Eingabewerte** (Bezugnehmend auf Bild 2.25 und Tabelle 2.6)

|          |     |                                       |
|----------|-----|---------------------------------------|
| $p_{RD}$ | MPa | Druck am Eintritt in die Rohrschlange |
| $t_{RD}$ | °C  | Eintrittstemperatur des Dampfstromes  |
| $d_{RD}$ | mm  | Rohrinnendurchmesser der Rohrschlange |

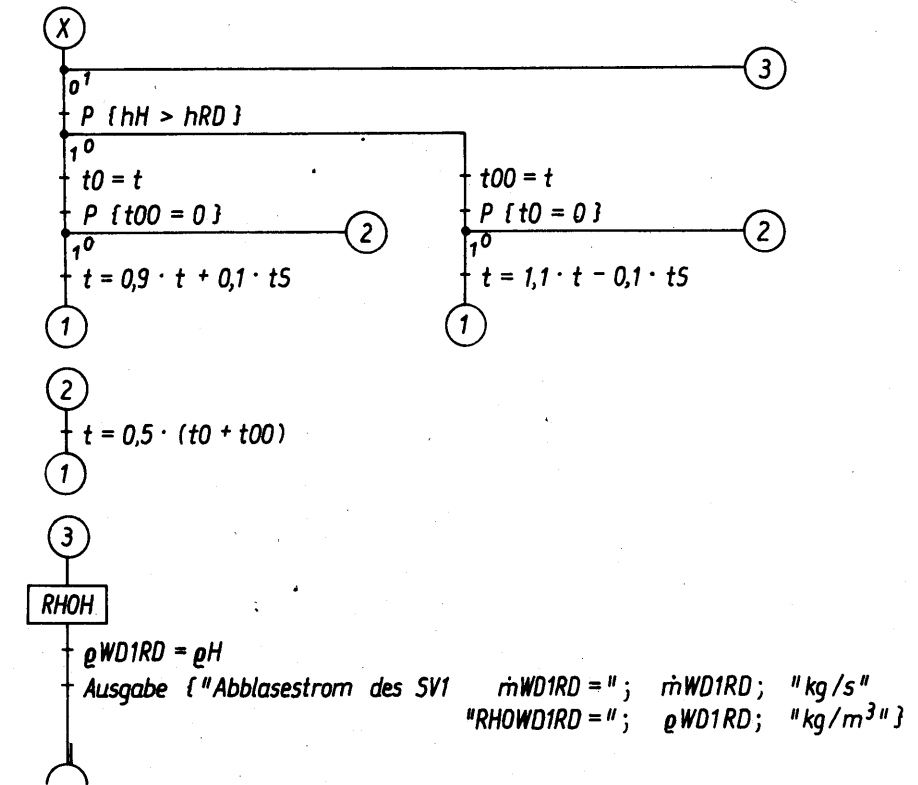
### 2.6.3. Beispiel

Ein Wärmeübertrager ist mit Rohren des Innendurchmessers  $d_{RD} = 0,015$  m bestückt. Zur druckmäßigen Absicherung des Wasserraumes dient ein Sicherheitsventil SV1 mit dem Ansprechdruck  $p_{A,1} = 0,4$  MPa. Der Heizdampf (Sattdampf;  $p_{RD} = 0,5$  MPa;  $\rho_{RD} = 2,668$  kg/m<sup>3</sup>) strömt in den Rohren.

Es ist die mögliche Belastung des Sicherheitsventils im Falle eines Rohrbruchs zu ermitteln.



**Bild 2.26** Flußplan des Unterprogramms **ABS-RD** (Abblasestrom - Rohrbruch/Dampf) zur Ermittlung der Abblaseströme bei Bruch eines dampfdurchströmten Rohres



**Bild 2.26(2)**

### Lösung

Die Auswertung der Gl. (2.59) ergibt folgende Werte:

$$\left. \begin{aligned} \frac{æ}{1,4} x_T &= \frac{1,135}{1,4} \cdot 0,55 = 0,446 \\ \frac{p_{RD} - p_{BD}}{p_{RD}} &= \frac{0,5 - 0,4}{0,5} = 0,2 \end{aligned} \right\} \rightarrow x = 0,2.$$

Damit liefert Gl. (2.58) den abzublasenden Massestrom

$$\dot{m}_{WD,1} = \sqrt{2} \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \frac{15^2}{4} \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,2}{2,143 \cdot 1,135 \cdot 0,55}\right) \cdot \sqrt{0,2 \cdot 0,5 \cdot 2,668} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{WD,1} = 0,11 \text{ kg/s.}$$

Die Enthalpie des im Rohr strömenden Sattedampfes beträgt nach Wasserdampf-tafel  $h_{RD} = 2748,5 \text{ kJ/kg}$ . Bei Entspannung auf  $p_{BD} = 0,4 \text{ MPa}$  ergibt sich bei konstant bleibender

Enthalpie eine Dichte

$$\rho_{WD,1} \approx 2,13 \text{ kg/m}^3.$$

Die Auswertung mittels Rechenprogramms, welches nach Flußbild 2.26 gestaltet wurde, liefert das nachfolgende Protokoll:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |                  |
| Absicherungsvariante                                                   | V = 1            |
| Steuergröße                                                            | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 = 0.4000 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 = 2.200 m     |
| Behälterfüllung                                                        | W = 1.0          |

| LF:ABS-RD Unkontrollierter Dampfzufluß infolge Rohrreißer |                                    |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEDATEN:</b>                        |                                    |
| Dampfdruck am Eintritt in die Rohrschlange                | pRD = 0.500000 MPa                 |
| Temperatur des zuströmenden Dampfes                       | tRD = 150 °C                       |
| Rohrinnendurchmesser der Rohrschlange                     | dR = 15.0 mm                       |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                        |                                    |
| Ablassstrom des SV1: Massestrom                           | mWD1RD = 0.1101 kg/s               |
| Dichte                                                    | RHOWD1RD = 2.134 kg/m <sup>3</sup> |

## 2.7 Volumenexpansion durch Wärmezufuhr (Heizung)

Die Beheizung des Wassers in Behältern erfolgt aus den verschiedensten Gründen. Die in den nachfolgenden Bildern dargestellten Beispiele verdeutlichen die Vielfalt und die unterschiedlichen Belastungen der Sicherheitsventile. Gemäß den im Abschnitt 1. getroffenen Festlegungen ist stets nur ein Havariefall zu betrachten. Die Reduzierung oder die völlige Unterbrechung der Entnahme des aufgeheizten Wassers bzw. des erzeugten Dampfes kann durchaus betriebsüblich sein und zählt somit nicht als Havariefall. Bild 2.27 zeigt einen stehenden Warmwasserbereiter. Der Wasserinhalt wird aufgeheizt, wobei eine Volumenexpansion eintritt. Das Ausdehnungsvolumen fließt über SV2 ab. Dies ist ein normaler Betriebsfall, d.h., SV2 erfährt bei Nullentnahme eine schaltungsbedingte Dauerbelastung, die keinem Havariefall entspringt. Für die Bemessung des Sicherheitsventils wird allerdings die maximal mögliche Zufuhr von Heizmedium angesetzt, die bei Ausfall der Temperaturregelung TC auftritt.

Das Bild 2.28 stellt einen Dampferzeuger dar, der mit einem Heißwasserstrom beheizt wird. Das einströmende Speisewasser  $\dot{m}_2$  der Temperatur  $t_2$  erfährt eine Aufheizung auf Siedetemperatur und einen anschließenden Phasenwechsel. Dabei tritt eine große Volu-

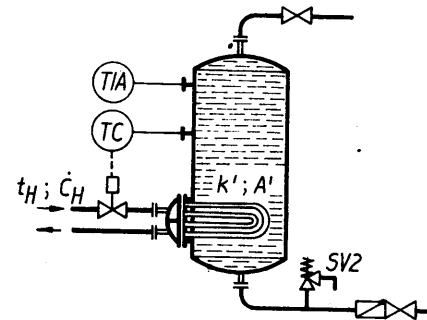


Bild 2.27 Stehender Warmwasserbereiter mit kaltwasserseitiger Absicherung

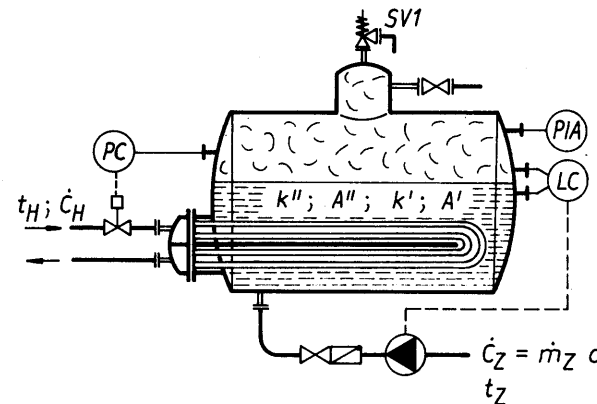


Bild 2.28 Heißwasserbeheizter Dampferzeuger mit Anordnung des Sicherheitsventils am Dampfdom

menzunahme auf. Bei Normalbetrieb wird der entstandene Dampf als Sattdampf dem aufgesetzten Dampfdom entnommen. Versagt die PC-Regelung, so erfolgt die maximal mögliche Wärmezufuhr. Das Sicherheitsventil wird für diesen Fall bei gleichzeitiger Nullentnahme, d.h. abgesperrter Dampfleitung, bemessen. Der Zuspaisestrom  $\dot{m}_2$  sei jedoch eine genau definierte Größe. Eine anders geartete Belastung würde provoziert, wenn die LC-Wasserstandsregelung ausfällt. Die erhöhte Zuspaisung bewirkt schließlich einen Druckanstieg, wodurch die Heizmedienzufuhr schließt. Während dieses Schließvorganges wird natürlich noch Wärme in den Behälter transportiert. Außerdem erfolgt die Übertragung von Speicherwärme. Die Fälle ungeregelter Wasserzufuhr infolge Pumpenförderung bzw. über ein defektes Stellventil wurden zwar bereits in den Abschnitten 2.2 und 2.3. behandelt, nicht aber bei zusätzlicher Wärmezufuhr im Behälter.

Im Bild 2.29 wird ein Wasserkessel mit Rostfeuerung gezeigt, dessen Wärmezufuhr  $\dot{Q}_H$  in der Regel nicht direkt beeinflussbar ist. Für die Auslegung des Sicherheitsventils muß somit der maximale Wärmestrom angesetzt werden. Welcher Zufluß  $\dot{m}_2$  die größte Belastung des Sicherheitsventils darstellt, bedarf der detaillierten Untersuchung, da der sich bildende Dampfstrom möglicherweise eine Funktion von  $\dot{m}_2$  sein kann.

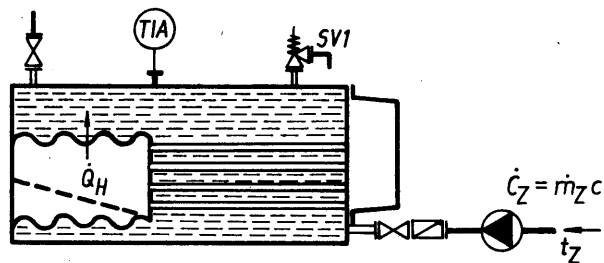


Bild 2.29 Wasserkessel mit Rostfeuerung und Anordnung des Sicherheitsventils an der höchsten Stelle des Wasserraumes

Zur eindeutigen Lastzuordnung sind nur die Absicherungsvarianten V=1 und im Sonderfall V=2 zu verwenden (Tabelle 2.1). Die Variante V=2 ist nur zulässig, wenn mit Sicherheit keine Dampfbildung auftreten kann. Dies trifft dann zu, wenn die Heizmedientemperatur  $t_H$  kleiner als die zum Ansprechdruck gehörige Siedetemperatur  $t_{S(p_{A,2})}$  ist oder wenn die Wärmezufuhr von einem Regler und Sicherheitstemperaturbegrenzer direkt beeinflusst wird.

Der Lastfall "Volumenexpansion durch Wärmezufuhr" umfaßt vielfältige Versionen. Außer der **thermischen Ausdehnung** des Wassers ist - wie bereits beschrieben - auch der **Phasenwechsel** zu betrachten.

Es muß weiterhin unterschieden werden, ob die Aufheizung des Wassers im **abgeschlossenen Behälter**, im **geschlossenen Kreislauf ohne Abkühlung** oder bei **laufender Einspeisung bei abgesperrtem Abfluß** erfolgt.

Bezüglich der Wärmezufuhr sind drei qualitativ unterschiedliche Fälle zu analysieren:

I. Eine **konstante Heizleistung**  $\dot{Q}_H$  ist beispielsweise bei einer elektrischen Widerstandsheizung gegeben, da sich der Widerstand nur geringfügig mit der Temperatur ändert. Die zeitlich konstante Wärmezufuhr  $\dot{Q}_H$  führt zu einfachen Algorithmen. Deshalb wird auch bei Kesselanlagen häufig  $\dot{Q}_H$  aus der Leistungsangabe plus einem Zuschlag für evtl. Überlastung gebildet und für die weiteren Betrachtungen verwendet. Bei Wärmeübertragern ist der Wärmestrom eine Funktion der Temperaturen, Masseströme u.a.m. Am einfachsten und sichersten ist es, wenn der maximal erreichbare Wärmestrom als  $\dot{Q}_H$  deklariert wird. Dies sei empfohlen, wenn der daraus resultierende Abblasestrom nicht das entscheidende Kriterium für die Bemessung des Sicherheitsventils darstellt, sondern lediglich der Nachweisführung dient. Liefert dagegen der nach der beschriebenen einfachen Methode berechnete Abblasestrom den größten Sicherheitsventil-Querschnitt, dann sollte eine detailliertere Rechnung nach II. oder III. erfolgen. Sie ist natürlich aufwendiger.

II. Eine **konstante Heizmedientemperatur** längs der Heizfläche  $t_H$  wird durch eine latente Wärmeentbindung bewirkt. Sie tritt beispielsweise bei der Kondensation von Heizdampf auf. Das Temperaturregime ist entsprechend einfach und die Berechnung gut überschaubar.

III. Eine **konstante Heizmedieneintrittstemperatur**  $t_H$  und ein **konstanter Heizmediestrom**  $\dot{m}_H$  sind signifikant für die fühlbare Wärmeentbindung, wie sie bei einem mit Rauchgas beheizten Abhitzekessel oder einem wasserbeheizten Wärmeübertrager üblich sind. Die Berechnung bereitet, vor allem bei einem aufzuheizenden Wasserstrom mit Teilverdampfung, einige Probleme. Die Lösungen sind oftmals nur iterativ möglich.

Zur Lösung der Fälle II. und III. müssen außer den thermischen und kalorischen Größen (Eintrittstemperaturen, Masseströme, spezifische Wärmekapazitäten bzw. Verdampfungsenthalpien) die Daten zur Heizfläche (Heizflächengröße A, Wärmedurchgangskoeffizient k) sowie die Art der Medienführung (Gleich-, Gegen-, Kreuzstrom oder Kombinationen) bekannt sein. Um den Wärmedurchgangskoeffizienten zu ermitteln, sind weitere detaillierte Kenntnisse über das Heizflächenmaterial, die Konstruktionsform, die Strömungsgeschwindigkeiten, die Größe sowie Art der Verschmutzung usw. erforderlich.

Index des Lastfalles: H

Charakteristische Eingangsgrößen:

|                             |                                                                                                |                            |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| $\dot{Q}_H$                 | Wärmestrom (Fall I.)                                                                           |                            |
| $t_H$                       | Temperatur des Heizmediums (Fall II.)                                                          |                            |
| $t_H$                       | Eintrittstemperatur des Heizmediums (Fall III.)                                                |                            |
| $\dot{C}_H$                 | Wärmekapazitätsstrom des Heizmediums (Fall III.)                                               |                            |
| $\dot{C}_H = \dot{m}_H c_H$ | $\dot{m}_H$ Heizmediestrom                                                                     |                            |
|                             | $c_H$ Spezifische Wärmekapazität des Heizmediums                                               |                            |
| $k'$                        | Wärmedurchgangskoeffizient (Heizmedium - Wasser)                                               | } (Fall II. und Fall III.) |
| $A'$                        | Heizfläche (Heizmedium - Wasser)                                                               |                            |
| $k''$                       | Wärmedurchgangskoeffizient (Heizmedium - Dampf)                                                |                            |
| $A''$                       | Heizfläche (Heizmedium - Dampf)                                                                |                            |
| $A_G$                       | Gesamtheizfläche                                                                               |                            |
| $\dot{C}_Z$                 | Wärmekapazitätsstrom des Wasserzuflusses                                                       |                            |
| $\dot{C}_Z = \dot{m}_Z c$   | $\dot{m}_Z$ Wasserzufluß                                                                       |                            |
|                             | $c$ Spezifische Wärmekapazität des Wassers                                                     |                            |
| $t_{\max}$                  | Maximale Temperatur des Wassers im Behälter (Ansprechwert des Sicherheitstemperaturbegrenzers) |                            |
| $t_Z$                       | Temperatur des Wasserzuflusses in den Wärmebereitsteller.                                      |                            |

### 2.7.1. Algorithmen

Allen Lastfällen mit Wärmetransport durch die Heizfläche haftet die Schwierigkeit der annähernd realen Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten  $k'$  bzw.  $k''$  an. Problematisch ist auch bei Aufheizung des Wasserstromes mit anschließender Verdampfung bzw. Teilverdampfung die Aufteilung der Gesamtheizfläche  $A_G$  in  $A'$  und  $A''$ . Eine relativ wirklichkeitsnahe Ermittlung kann nur mit speziell auf den jeweiligen Wärmeübertrager zugeschnittenen Rechenprogrammen erfolgen. Dabei ist von einer sauberen Heizfläche und größtmöglichen Wärmeübergangskoeffizienten auszugehen, d.h., es sind maximale  $k$ -Werte anzunehmen. In /16, Abschnitt 5./ werden zahlreiche Algorithmen zur speziellen Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten vorgestellt. Einige Hinweise finden sich im Anhang.

Die eingangs beschriebene Vielfalt der Lastversionen erfordert eine systematisierte Einzeldarstellung.

#### • Ausdehnung des Wassers im abgesperrten Behälter $t_H \leq t_S(p_A)$

Bei abgesperrtem Wasserzu- und -abfluß beträgt der abzuführende Wasserstrom (Volumenstrom bzw. Massestrom):

$$\dot{V} = \frac{dV_B}{d\tau} = m_B \frac{dv}{d\tau} = m_B \frac{dv}{dt} \frac{dt}{d\tau}$$

$$\dot{m} = \frac{m_B}{v} \frac{dv}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \rho \frac{dv}{dt} \frac{\dot{Q}_H}{c} \quad (2.62)$$

Dabei bedeuten:

$V_B$  Behältervolumen

$m_B$  Wassermasse im Behälter

$v$  Spezifisches Volumen des Wassers

$\rho$  Dichte des Wassers ( $\rho = 1/v$ )

$c$  Spezifische Wärmekapazität des Wassers

$t$  Wassertemperatur im Behälter

$dv/dt$  Volumenänderung, bezogen auf die Temperaturänderung

$dt/d\tau$  Temperaturänderung, bezogen auf die Zeitänderung

$\dot{Q}_H$  Wärmestrom.

Der temperaturabhängige Differentialquotient  $dv/dt$  und das Produkt  $\rho dv/dt$  sind in Tabelle 2.7 aufgeführt. Zugehörige Approximationsgleichungen finden sich im Anhang (Gln. (A13) und (A1)). Bei temperaturabhängigem Wärmestrom ist die Beziehung  $[\rho dv/dt (t_H - t)]$  relevant. Für abgestufte Temperaturen wurde dieser Term ebenfalls in Tabelle 2.7 vermerkt.

Für die Sicherheitsventil-Querschnittsberechnung ist der Quotient  $\dot{m}/\sqrt{\rho}$  maßgebend. Im Falle konstanter Heizleistung (Fall I.) muß deshalb die höchstmögliche Wassertempera-

Tabelle 2.7 Differentialquotient  $(dv/dt)_{p=2 \text{ MPa}}$  und Modifikationen

| t<br>°C | $10^6 \frac{dv}{dt}$<br>$\frac{\text{m}^3}{\text{kg K}}$ | $10^6 \rho \frac{dv}{dt}$<br>$\frac{1}{\text{K}}$ | $10^6 \rho \frac{dv}{dt} (t_H - t)$ |        |        |        |
|---------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
|         |                                                          |                                                   | $t_H = 50 \text{ °C}$               | 100 °C | 150 °C | 200 °C |
| 10      | 0,08                                                     | 80                                                | 3 202                               | 7 205  | 11 208 | 15 211 |
| 20      | 0,21                                                     | 210                                               | 6 295                               | 16 787 | 27 278 | 37 770 |
| 30      | 0,31                                                     | 309                                               | 6 179                               | 21 626 | 37 074 | 52 521 |
| 40      | 0,39                                                     | 387                                               | 3 873                               | 23 239 | 42 604 | 61 969 |
| 50      | 0,47                                                     | 465                                               | 0                                   | 23 239 | 46 478 | 69 717 |
| 60      | 0,54                                                     | 531                                               |                                     | 21 257 | 47 827 | 74 398 |
| 70      | 0,60                                                     | 587                                               |                                     | 17 615 | 46 973 | 76 331 |
| 80      | 0,67                                                     | 652                                               |                                     | 13 033 | 45 615 | 78 197 |
| 90      | 0,73                                                     | 705                                               |                                     | 7 052  | 42 311 | 77 570 |
| 100     | 0,78                                                     | 748                                               |                                     | 0      | 37 401 | 74 802 |
| 110     | 0,85                                                     | 809                                               |                                     |        | 32 358 | 72 805 |
| 120     | 0,91                                                     | 859                                               |                                     |        | 25 766 | 68 709 |
| 130     | 0,97                                                     | 907                                               |                                     |        | 18 149 | 63 520 |
| 140     | 1,04                                                     | 964                                               |                                     |        | 9 639  | 57 832 |
| 150     | 1,11                                                     | 1 019                                             |                                     |        | 0      | 50 932 |
| 160     | 1,19                                                     | 1 081                                             |                                     |        |        | 43 226 |
| 170     | 1,28                                                     | 1 150                                             |                                     |        |        | 34 487 |
| 180     | 1,37                                                     | 1 216                                             |                                     |        |        | 24 318 |
| 190     | 1,47                                                     | 1 289                                             |                                     |        |        | 12 886 |
| 200     | 1,59                                                     | 1 376                                             |                                     |        |        | 0      |

Die Zahlenwerte gelten in guter Näherung auch für  $p = 1 \text{ MPa}$  bis zur Siedetemperatur.

tur im Behälter  $t_{\max}$  (Einstellwert des Sicherheitstempurbegrenzers) zur Auswertung der Gl. (2.62) angesetzt werden. Bei temperaturabhängigem Wärmestrom (Fälle II. und III.) ergeben sich maximale Ventilquerschnitte bei einer Wassertemperatur im Behälter von näherungsweise

$$t = 0,37 t_H + 8 \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (2.63)$$

mit  $t_H$  Heizmedientemperatur in  $^\circ\text{C}$ .

Die Dichte des Abblasestromes ist für die Temperatur  $t$  zu bilden:  $\rho_W = \rho_W(t)$ .

Falls beide Absicherungsvarianten anwendbar sind, gelten bei **Variante 1** bzw. **Variante 2** für den jeweiligen Abblasestrom

$$\dot{m}_{W,1} = \dot{m} \quad \text{bzw.} \quad \dot{m}_{W,2} = \dot{m}. \quad (2.64)$$

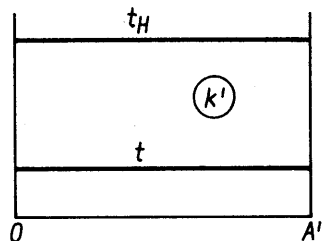
Die Größe  $\dot{m}$  wird nachfolgend in Abhängigkeit des Belastungsfalles ermittelt.

#### Lastfall H1: Konstante Heizleistung

Dieser Fall ist beispielsweise bei einem elektrisch beheizten Warmwasserbereiter, der mit einer zugelassenen Sicherheitstemporebegrenzung ausgerüstet ist, gegeben. Der vom Sicherheitsventil abzuführende Massestrom  $\dot{m}$  berechnet sich nach Gl. (2.62). Der Größtwert folgt entsprechend Tabelle 2.7 für die maximal mögliche Wassertemperatur  $t_{\max}$ .

#### Lastfall H2: Konstante Heizmedientemperatur bei latenter Wärmeentbindung

Wird ein Warmwasserbereiter mit kondensierendem Dampf der Temperatur  $t_H$  beheizt, so stellt sich bei idealer Durchmischung des Behälterinhaltes die zeitabhängige Temperatur  $t$  ein. Gemäß nebenstehendem Temperatur-Heizflächen-Schaubild wird der Wärmestrom



$$\dot{Q}_H = k' A' (t_H - t) \quad (2.65)$$

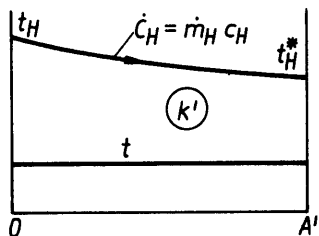
übertragen. Die Substitution dieser Beziehung in Gl. (2.62) liefert den Abblasestrom

$$\dot{m} = \varrho \frac{dv}{dt} (t_H - t) \frac{k' A'}{c}. \quad (2.66)$$

Der größte Sicherheitsventilquerschnitt folgt für die gemäß Gl. (2.63) berechnete Temperatur  $t$ . Der Term  $\varrho \frac{dv}{dt} (t_H - t)$  kann Tabelle 2.7 entnommen werden.

#### Lastfall H3: Konstante Heizmedieneintrittstemperatur und konstanter Heizmedienstrom bei fühlbarer Wärmeentbindung

Erfolgt die Aufheizung eines Warmwasserbereiters mit einem Gas- oder Flüssigkeitsstrom  $\dot{C}_H$  der Eintrittstemperatur  $t_H$ , so ergibt sich bei idealer Durchmischung die zeitabhängige Wassertemperatur  $t$  im Behälter. Aus dem Temperatur-Heizflächen-Schaubild folgen die Beziehungen:



$$t_H^* - t = (t_H - t) e^{-k' A' / \dot{C}_H}$$

$$\dot{Q}_H = \dot{C}_H (t_H - t) \left[ 1 - e^{-k' A' / \dot{C}_H} \right]. \quad (2.67)$$

Das Einsetzen in Gl. (2.62) ergibt den Abblasestrom des Sicherheitsventils.

$$\dot{m} = \varrho \frac{dv}{dt} (t_H - t) \frac{\dot{C}_H}{c} \left[ 1 - e^{-k' A' / \dot{C}_H} \right]. \quad (2.68)$$

Zur Ermittlung des Größtwertes mit  $t$  nach Gl. (2.63) kann Tabelle 2.7 genutzt werden.

#### • Ausdehnung des Wassers im geschlossenen Kreislauf ohne Abkühlung $t_H \cong t_S(p_A)$

Erfolgt die Aufheizung eines im Kreislauf durch ein Rohr- und Apparatesystem geförderten Wasserstromes  $\dot{m}_Z$  der Temperatur  $t_Z$  in einem Wärmebereitsteller auf die Temperatur  $t_Z^*$ , ohne daß gleichzeitig Wärme an einer anderen Stelle abgeführt wird, so ist der Wasserstrom

$$\dot{V} = \dot{m}_Z \left[ v(t_Z^*) - v(t_Z) \right] = \dot{m}_Z \frac{dv}{dt} (t_Z^* - t_Z)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_Z}{v} \frac{dv}{dt} (t_Z^* - t_Z) = \varrho \frac{dv}{dt} \frac{\dot{Q}_H}{c} \quad (2.69)$$

aus dem System abzuleiten. Der Differentialquotient  $dv/dt$  bezieht sich auf die arithmetische Wassermitteltemperatur  $t$ . Es bedeuten zusätzlich zur Legende der Gl. (2.62):

- $\dot{m}_Z$  Wasserstrom, der im Wärmebereitsteller aufgeheizt wird
- $v(t_Z^*)$  Spezifisches Volumen bei Wasseraustrittstemperatur
- $v(t_Z)$  Spezifisches Volumen bei Wassereintrittstemperatur.

Normalerweise hat die Druckhalteeinrichtung des Systems die Aufgabe,  $\dot{m}$  abzuführen. Fällt diese Regelung jedoch aus, muß beispielsweise bei einer nach Bild 2.29 realisierten Schaltung SV1 das Abspeisen von  $\dot{m}$  übernehmen.

Formal sind die Gln. (2.62) und (2.69) identisch. Somit bleibt auch weiterhin die Tabelle 2.7 bedeutungsvoll. Je nach Art der Wärmezufuhr unterscheiden sich jedoch trotz der vorgenannten Identität die detaillierten Berechnungen.

Es wird vorgeschlagen, die Dichte für die mittlere Temperatur  $t$  zu bilden  $\varrho_w = \varrho_w(t)$ . Genaugenommen müßte diese bei  $V=1$  für  $t_Z^*$  und bei  $V=2$  je nach Anordnung des SV2 evtl. für den Minimalwert  $t_Z$  ermittelt werden. Die Abweichungen sind jedoch relativ gering, zumal für die Querschnittsberechnung des Sicherheitsventiles ohnehin nur der Faktor  $\sqrt{\varrho}$  eingeht.

Die nachfolgend berechneten Abblasemasseströme  $\dot{m}$  werden bei **Variante 1** dem Sicherheitsventil SV1 bzw. bei **Variante 2** SV2 zugewiesen:

$$\dot{m}_{W,1} = \dot{m} \quad \text{bzw.} \quad \dot{m}_{W,2} = \dot{m}. \quad (2.70)$$

**Lastfall H4: Konstante Heizleistung**

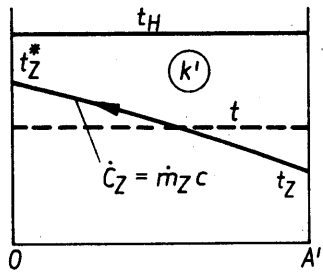
Erfolgt die Erwärmung des Wasserstromes  $\dot{m}_Z$  von  $t_Z$  auf  $t_Z^*$  z.B. durch eine elektrische Widerstandsheizung der konstanten Leistung  $\dot{Q}_H$ , so berechnet sich der Abblasestrom  $\dot{m}$  sofort nach Gl. (2.69). Für die höchste erreichbare Mitteltemperatur gilt

$$t = t_{\max} - \frac{\dot{Q}_H}{2 \dot{m}_Z c}, \quad (2.71)$$

wobei  $t_{\max}$  die Ansprechtemperatur des Sicherheitstempurbegrenzers darstellt. Für diese Temperatur  $t$  ist der Term  $\varrho dv/dt$  zu bilden.

**Lastfall H5: Konstante Heizmedientemperatur bei latenter Wärmeentbindung**

In einem dampfbeheizten Wärmeübertrager stellt sich beim Durchsatz von  $\dot{C}_Z$  nebenstehendes Temperaturregime ein. Schrittweise ergeben sich:



$$t_H - t_Z^* = (t_H - t_Z) e^{-k' A' / \dot{C}_Z}$$

$$\dot{Q}_H = \dot{C}_Z (t_H - t_Z) \left[ 1 - e^{-k' A' / \dot{C}_Z} \right]$$

Die mittlere Wassertemperatur beim Aufheizen beträgt

$$t = t_Z + \frac{\dot{Q}_H}{2 \dot{C}_Z}$$

Unter Verwendung dieser Temperatur berechnet sich der Wärmestrom zu

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{C}_Z}{\frac{1}{1 - e^{-k' A' / \dot{C}_Z}} - \frac{1}{2}} (t_H - t). \quad (2.72)$$

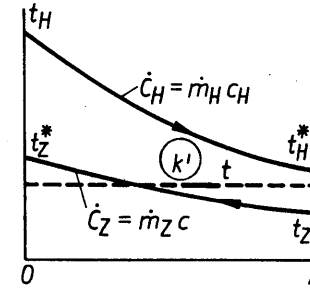
Die Substitution in Gl. (2.69) liefert den Abblasestrom

$$\dot{m} = \varrho \frac{dv}{dt} (t_H - t) \dot{m}_Z \frac{1}{\frac{1}{1 - e^{-k' A' / \dot{C}_Z}} - \frac{1}{2}}. \quad (2.73)$$

Der im Kreislauf umgewälzte Wasserstrom  $\dot{m}_Z$  erwärmt sich mit zunehmender Zeit. Der maximale Abblasestrom folgt bei der Temperatur  $t$ , die nach Gl. (2.63) näherungsweise bestimmbar ist.

**Lastfall H6: Konstante Heizmedieneintrittstemperatur und konstanter Heizmedienstrom bei fühlbarer Wärmeentbindung**

Die beiden Wärmekapazitätsströme  $\dot{C}_H$  und  $\dot{C}_Z$  werden im Gegenstrom geführt, da hierbei der Wärmeaustausch am effektivsten erfolgt. Das Temperatur-Heizflächen-Schaubild gibt einen Überblick über die thermodynamischen Reaktionen. Der übertragene Wärmestrom kann



$$\dot{Q}_H = \dot{C}_Z (t_Z^* - t_Z)$$

geschrieben werden. Mit der Betriebscharakteristik für den Gegenströmer

$$\Phi = \frac{t_Z^* - t_Z}{t_H - t_Z} = \frac{1 - e^{(1/\dot{C}_H - 1/\dot{C}_Z) k' A'}}{1 - (\dot{C}_Z/\dot{C}_H) e^{(1/\dot{C}_H - 1/\dot{C}_Z) k' A'}} \quad (2.74)$$

bzw. dem Grenzwert für  $\dot{C}_Z = \dot{C}_H$

$$\Phi = \frac{k' A' / \dot{C}_Z}{1 + k' A' / \dot{C}_Z} \quad (2.74a)$$

folgt dann

$$\dot{Q}_H = \dot{C}_Z (t_H - t_Z) \Phi.$$

Nach Einführen der mittleren Temperatur

$$t = t_Z + \frac{\dot{Q}_H}{2 \dot{C}_Z}$$

ergibt sich schließlich

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{C}_Z}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{2}} (t_H - t). \quad (2.75)$$

Der Abblasestrom, mit dem das Sicherheitsventil beaufschlagt wird, berechnet sich nach Einsetzen in Gl. (2.69) zu

$$\dot{m} = \varrho \frac{dv}{dt} (t_H - t) \dot{m}_Z \frac{1}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{2}}. \quad (2.76)$$

Die zur maximalen Belastung führende Mitteltemperatur  $t$  kann wiederum in guter Näherung mittels Gl. (2.63) bestimmt werden.

Die Gln. (2.72) und (2.73) sind Sonderfälle der Gln. (2.75) und (2.76), die sich nach Bilden von  $\Phi$  gemäß Gl. (2.74) für  $\dot{C}_H \rightarrow \infty$  ergeben.

### • Verdampfung im abgesperrtem Behälter $t_H > t_S(p_{A,1})$

Wird bei den genannten Temperaturrelationen dem in einem Behälter eingeschlossenen Wasser Wärme zugeführt, so bildet sich bei  $t_S$  Dampf, der über das Sicherheitsventil SV1 (nur **Variante 1** zulässig!) abzublasen ist. Der Dampfstrom berechnet sich nach der Beziehung

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{\dot{Q}_H}{\Delta h_V}, \quad (2.77)$$

wobei

$\Delta h_V$  Verdampfungsenthalpie ( $\equiv$  Verdampfungswärme  $r$ ) bei  $t_S(p_{A,1})$  bzw. bei  $p_{A,1}$

bedeutet.

Der Wärmestrom  $\dot{Q}_H$  ist bei konstanten Heizmedienparametern ebenfalls konstant, da bei der Erzeugung von Sattdampf stets gleichbleibende Wärmeübertragungsbedingungen vorliegen. Die Größe des Wärmestromes  $\dot{Q}_H$  ist auf der Grundlage der jeweiligen wärmetechnischen Gegebenheiten zu ermitteln.

Für die Dichte bei Abblasebedingungen gilt  $\rho_S = \rho_S(p_{A,1})$ . Sie kann den Wasserdampf-tafeln entnommen oder nach Gl. (A3) berechnet werden.

Infolge der Verdampfung verringert sich die Wassermenge im abgesperrtem Behälter. Im Zeitintervall  $\Delta \tau$  beträgt die Masseminderung  $\dot{m}_{WD,1} \Delta \tau$ .

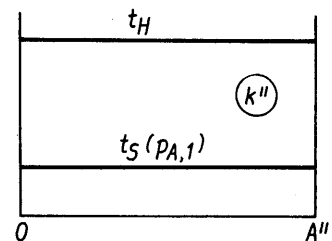
### Lastfall H7: Konstante Heizleistung

In einem elektrisch beheizten Wassererwärmer ohne wirksame Temperaturbegrenzung wird bei der zum Abblasedruck gehörigen Siedetemperatur Wasser verdampfen. Die Heizleistung  $\dot{Q}_H$  ist bekannt. Der entsprechende Dampfstrom kann sofort nach Gl. (2.77) bestimmt werden.

Diese Verfahrensweise ist auch auf Kessel mit Feuerungen oder übliche Wärmeübertrager anwendbar, wenn Kenntnisse über  $\dot{Q}_H$  vorliegen. Oftmals werden die Leistungsangaben der Hersteller direkt verwendet oder entsprechend den Einsatzbedingungen modifiziert. Die technischen Vorschriften, z.B. /15/, enthalten einige entsprechende Angaben. Zur analytischen Ermittlung von  $\dot{Q}_H$  geben die nachfolgenden Belastungsfälle Hinweise.

### Lastfall H8: Konstante Heizmedientemperatur bei latenter Wärmeentbindung

Wird in einem dampfbeheizten Wärmeübertrager das sekundärseitig eingeschlossene Wasser verdampft, so gilt das nebenstehende, einfache Heizflächen-Temperatur-Schaubild. Der übertragene Wärmestrom ergibt sich zu



$$\dot{Q}_H = k'' A'' (t_H - t_S), \quad (2.78)$$

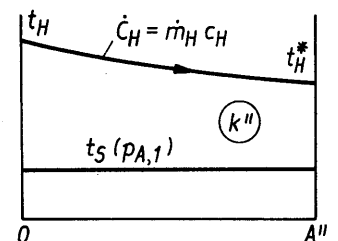
so daß Gl. (2.77)

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{k'' A''}{\Delta h_V} (t_H - t_S) \quad (2.79)$$

lautet.

### Lastfall H9: Konstante Heizmedieneintrittstemperatur und konstanter Heizmedienstrom bei fühlbarer Wärmeentbindung

Erfolgt die Wärmezufuhr durch einen Gas- oder Flüssigkeitsstrom  $\dot{C}_H$  der Eintrittstemperatur  $t_H$ , so ergibt sich gemäß den wärmetechnischen Verhältnissen:



$$t_H^* - t_S = (t_H - t_S) e^{-k'' A'' / \dot{C}_H}$$

$$\dot{Q}_H = \dot{C}_H (t_H - t_S) \left[ 1 - e^{-k'' A'' / \dot{C}_H} \right]. \quad (2.80)$$

Der abzublasende Dampfstrom lautet dann

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{\dot{C}_H}{\Delta h_V} (t_H - t_S) \left[ 1 - e^{-k'' A'' / \dot{C}_H} \right]. \quad (2.81)$$

### • Erwärmung bzw. Verdampfung des zufließenden Wassers bei abgesperrtem Abfluß

Wird ein vorgegebener Wasserstrom ( $\dot{m}_Z, c, t_Z$ ) in einen Wärmebereitsteller eingespeist und dort der Wärmestrom  $\dot{Q}_H$  übertragen, so erfolgt gemäß Wärmebilanz

$$\dot{m}_Z c (t - t_Z) = \dot{Q}_H \quad (2.82)$$

die Aufheizung auf die Temperatur

$$t = t_Z + \frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_Z c}, \quad (2.83)$$

wenn  $t$  unter der zum Ansprechdruck  $p_A$  gehörigen Sättigungstemperatur  $t_S(p_A)$  liegt. Ist eine zugelassene Sicherheitstemperaturbegrenzung im Fall I. ( $\dot{Q}_H = \text{const}$ ) installiert oder liegt in den Fällen II. bzw. III.  $t_H < t_S(p_{A,2})$ , so darf außer **Variante 1**

ausnahmsweise auch **Variante 2** angewendet werden. Es ergibt sich dann für die Belastung der Sicherheitsventile SV1 bzw. SV2:

$$\dot{m}_{W,1} = \dot{m}_Z \quad \text{oder} \quad \dot{m}_{W,2} = \dot{m}_Z. \quad (2.84)$$

Als zugehörige Dichte wird  $\rho_W = \rho_W(t)$  verwendet. Dies stellt für die Berechnung des Sicherheitsventils den ungünstigsten Fall dar. Ist SV2 unmittelbar am Wassereintrittsstutzen für  $\dot{m}_Z$  angeordnet, so könnte das Wasser auch ohne jegliche thermische Veränderung dem Sicherheitsventil direkt zufließen ( $\rho_W = \rho_W(t_Z)$ ).

Sind die vorgenannten Temperaturbegrenzungen nicht gegeben, so kann die nach Gl. (2.83) berechnete Temperatur  $t$  über  $t_S(p_{A,1})$  liegen, und das zuströmende Wasser  $\dot{m}_Z$  wird zumindest teilweise verdampfen. Es ist nur **Variante 1** zulässig. Der Dampfstrom  $\dot{m}_{WD,1}$  ergibt sich aus der Enthalpiebilanz

$$\dot{m}_Z c (t_S - t_Z) + \dot{m}_{WD,1} \Delta h_V = \dot{Q}_H \quad (2.85)$$

zu

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{\dot{Q}_H - \dot{m}_Z c (t_S - t_Z)}{\Delta h_V}. \quad (2.86)$$

Je nach den Relationen zwischen  $\dot{m}_{WD,1}$  und  $\dot{m}_Z$  gibt es nachfolgende Betriebsversionen:

- Erfolgt keine Einspeisung oder hat das eintretende Wasser Siedetemperatur ( $\dot{m}_Z = 0$  oder  $t_Z = t_S$ ), dann handelt es sich um die gleichen Bedingungen wie bei einem abgesperrten Behälter. Die Gl. (2.86) geht so in Gl. (2.77) über. Der Dampfstrom  $\dot{m}_{WD,1}$  ist abzublasen.

- Ist  $\dot{m}_{WD,1} > \dot{m}_Z$ , so verringert sich der Wasserinhalt im Kessel oder Wärmeübertrager. Dies könnte beispielsweise vorkommen, wenn die Zuspelung in den Kessel ungenügend erfolgt oder der Rücklaufzufluß eines Wärmeübertragers gedrosselt ist. Das Sicherheitsventil muß für die Dampfausströmung  $\dot{m}_{WD,1}$  bemessen werden.

- Gilt  $\dot{m}_{WD,1} < \dot{m}_Z$ , so erfolgt nur eine Teilverdampfung des zugespeisten Wasserstromes  $\dot{m}_Z$ . Damit steht vor dem Sicherheitsventil bereits ein Dampf-Wasser-Gemisch an. Es setzt sich aus den Anteilen Dampfstrom  $\dot{m}_{WD,1}$  und Wasserstrom

$$\dot{m}_{W,1} = \dot{m}_Z - \dot{m}_{WD,1} \quad (2.87)$$

zusammen.

Als Dichten sind anzusetzen:  $\rho_{WD} = \rho_S(p_{A,1})$ ;  $\rho_W = \rho_W(t_S)$ .

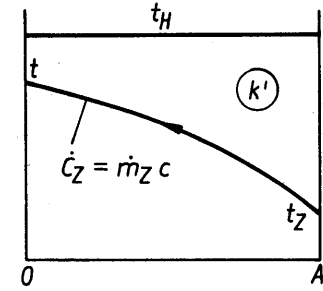
Der zugeführte Wärmestrom  $\dot{Q}_H$  ist wiederum von den speziellen wärmetechnischen Bedingungen abhängig.

#### Lastfall H10: Konstante Heizleistung

Eine gute praktische Näherung ist durch einen elektrisch beheizten Kessel gegeben. Es gelten die Gln. (2.82) bis (2.87) unverändert.

#### Lastfall H11: Konstante Heizmedientemperatur bei latenter Wärmeentbindung

Tritt in einem dampfbeheizten Wärmeübertrager mit der Gesamtheizfläche  $A_G$  der Wasserstrom  $\dot{m}_Z$  mit der Temperatur  $t_Z$  ein, so wird zur Aufheizung auf die Temperatur  $t$  ohne Phasenwechsel die Leistung

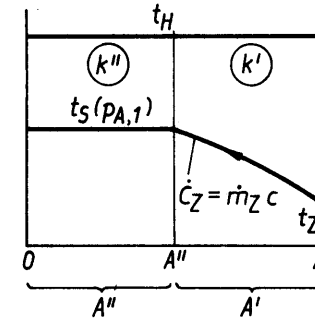


$$\dot{Q}_Z (t - t_Z) = k' A_G \frac{t - t_Z}{\ln \frac{t_H - t_Z}{t_H - t}} \quad (2.88)$$

benötigt. Aus dieser Bilanz berechnet sich die Endtemperatur

$$t = t_H - (t_H - t_Z) e^{-k' A_G / \dot{Q}_Z}. \quad (2.89)$$

Für  $t \leq t_S(p_A)$  gilt Gl. (2.84), ansonsten bildet sich Wasserdampf. Das Temperatur-Heizflächen-Schaubild hat dann die nebenstehende Form. Die Erwärmung von  $\dot{Q}_Z$  auf Siedetemperatur erfordert den Wärmestrom



$$\dot{Q}_Z (t_S - t_Z) = k' A' \frac{t_S - t_Z}{\ln \frac{t_H - t_Z}{t_H - t_S}}, \quad (2.90)$$

woraus die erforderliche Teilheizfläche

$$A' = \frac{\dot{Q}_Z}{k'} \ln \frac{t_H - t_Z}{t_H - t_S} \quad (2.91)$$

folgt. Damit steht für die Verdampfung rechnerisch die zweite Teilheizfläche

$$A'' = A_G - A' \quad (2.92)$$

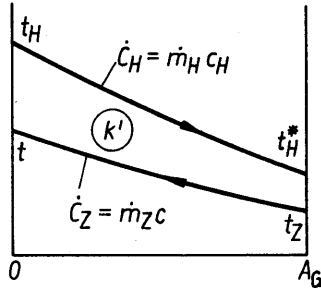
zur Verfügung. Aus einer Enthalpiebilanz berechnet sich dann der erzeugte Wasserdampfstrom, den SV1 abblasen muß:

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{k'' A''}{\Delta h_V} (t_H - t_S). \quad (2.93)$$

Falls  $\dot{m}_{WD,1} < \dot{m}_Z$  gilt, so tritt eine gleichzeitige, kombinierte Belastung von  $\dot{m}_{WD,1}$  und  $\dot{m}_{W,1}$  gemäß Gl. (2.87) auf.

### Lastfall H12: Konstante Heizmedieneintrittstemperatur und konstanter Heizmedienstrom bei fühlbarer Wärmeentbindung

Zuerst wird die theoretisch erreichbare Temperatur  $t$  berechnet, die sich beim Aufheizen des Zuspeseistromes  $\dot{m}_Z$  ohne Phasenwechsel ergibt. Die Betriebscharakteristik für Gegenströmer bei Ansatz der Gesamtheizfläche  $A_G$  lautet:



$$\Phi = \frac{t - t_Z}{t_H - t_Z} = \frac{1 - e^{(1/\dot{C}_H - 1/\dot{C}_Z) k' A_G}}{1 - (\dot{C}_Z/\dot{C}_H) e^{(1/\dot{C}_H - 1/\dot{C}_Z) k' A_G}} \quad (2.94)$$

bzw. für  $\dot{C}_H = \dot{C}_Z$

$$\Phi = \frac{k' A_G / \dot{C}_Z}{1 + k' A_G / \dot{C}_Z} \quad (2.94a)$$

Damit folgt die Austrittstemperatur des Massestromes  $\dot{m}_Z$

$$t = t_Z + (t_H - t_Z) \Phi \quad (2.95)$$

Für  $t \leq t_S(p_A)$  gilt Gl. (2.84), ansonsten entsteht Wasserdampf.

Die im Temperatur-Heizflächen-Schaubild noch unbekannten Temperaturen  $t_H^*$  und  $t_H^{**}$  lassen sich mit vertretbarem Aufwand durch wiederholte Rechnungen bestimmen. Es werden die folgenden Schritte vorgeschlagen:

- ① Annahme der Verdampferfläche  $A''$
- ② Bilanz um den Verdampfungsteil  $A''$

$$t_H^* = t_S + (t_H - t_S) e^{-k'' A'' / \dot{C}_H} \quad (2.96)$$

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{\dot{C}_H}{\Delta h_V} (t_H - t_H^*) \quad (2.97)$$

- ③ Ermittlung der Restheizfläche

$$A' = A_G - A'' \quad (2.98)$$

- ④ Bilanz um den Aufheizteil  $A'$

$$\Phi = \frac{t_S^* - t_Z}{t_H^* - t_Z} = \frac{1 - e^{(1/\dot{C}_H - 1/\dot{C}_Z) k' A'}}{1 - (\dot{C}_Z/\dot{C}_H) e^{(1/\dot{C}_H - 1/\dot{C}_Z) k' A'}} \quad (2.99)$$

Tabelle 2.8 Lastannahmen bei Wärmezufuhr (Heizung)(H)

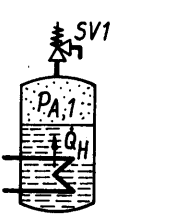
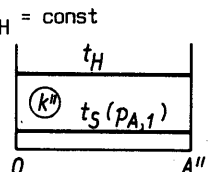
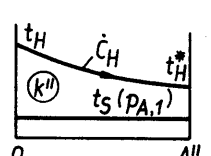
| Schaltung / Variante                               | Lastfall         | Abblasestrom     | Dichte                          |
|----------------------------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|
| <b>Aufheizung des abgesperrten Behälterinhalts</b> |                  |                  |                                 |
|                                                    | H1 <sup>1)</sup> | $\dot{m}_{W1H1}$ | $\varrho_{W1H1} = \varrho_W(t)$ |
|                                                    | H2               | $\dot{m}_{W2H1}$ | $\varrho_{W2H1} = \varrho_W(t)$ |
|                                                    | H3               | $\dot{m}_{W1H3}$ | $\varrho_{W1H3} = \varrho_W(t)$ |
|                                                    | H4               | $\dot{m}_{W2H3}$ | $\varrho_{W2H3} = \varrho_W(t)$ |

### Aufheizung des zirkulierenden Anlageninhalts bei verbotener Wärmeabfuhr

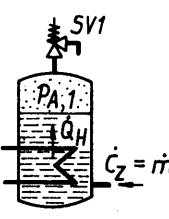
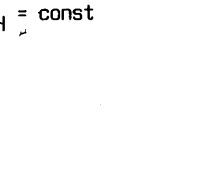
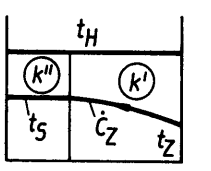
|  |                  |                  |                                 |
|--|------------------|------------------|---------------------------------|
|  | H4 <sup>1)</sup> | $\dot{m}_{W1H4}$ | $\varrho_{W1H4} = \varrho_W(t)$ |
|  | H5               | $\dot{m}_{W2H4}$ | $\varrho_{W2H4} = \varrho_W(t)$ |
|  | H6               | $\dot{m}_{W1H6}$ | $\varrho_{W1H6} = \varrho_W(t)$ |
|  | H7               | $\dot{m}_{W2H6}$ | $\varrho_{W2H6} = \varrho_W(t)$ |

1) H1 und H4 sind nur bei Einsatz zugelassener Sicherheitstemperaturbegrenzungseinrichtungen mit  $t_{\max} < t_S(p_A)$  anwendbar!

Tabelle 2.8 (Fortsetzung)

| Schaltung / Variante                                                                                                         | Lastfall                                                                          | Abblasestrom                                                                      | Dichte            |                                        |                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Verdampfen des abgesperrten Behälterinhalts                                                                                  |                                                                                   |                                                                                   |                   |                                        |                                        |
|  <p><math>t_H &gt; t_{S(p_{A,1})}</math></p> | $V=1$                                                                             | $\dot{Q}_H = \text{const}$                                                        | H7                | $\dot{m}_{WD1H7}$                      | $\varrho_{WD1H7} = \varrho_S(p_{A,1})$ |
|                                                                                                                              |                                                                                   |  | H8                | $\dot{m}_{WD1H8}$                      | $\varrho_{WD1H8} = \varrho_S(p_{A,1})$ |
|                                                                                                                              |  | H9                                                                                | $\dot{m}_{WD1H9}$ | $\varrho_{WD1H9} = \varrho_S(p_{A,1})$ |                                        |

**Aufheizen/Verdampfen des Behälterinhalts bei konstanter Zuströmung**

|                                                                                  |     |                                                                                    |     |                                                                                                                                                |  |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  | V=1 | $\dot{Q}_H = \text{const}$                                                         | H10 | $\begin{bmatrix} \dot{m}_{W1H10} & \varrho_{W1H10} = \varrho_W(t_S) \\ \dot{m}_{WD1H10} & \varrho_{WD1H10} = \varrho_S(p_{A,1}) \end{bmatrix}$ |  |
|                                                                                  |     |   | H11 | $\begin{bmatrix} \dot{m}_{W1H11} & \varrho_{W1H11} = \varrho_W(t_S) \\ \dot{m}_{WD1H11} & \varrho_{WD1H11} = \varrho_S(p_{A,1}) \end{bmatrix}$ |  |
|                                                                                  | V=2 |  | H12 | $\begin{bmatrix} \dot{m}_{W1H12} & \varrho_{W1H12} = \varrho_W(t_S) \\ \dot{m}_{WD1H12} & \varrho_{WD1H12} = \varrho_S(p_{A,1}) \end{bmatrix}$ |  |

$$\text{Für } \dot{C}_Z = \dot{C}_H \text{ gilt der Grenzwert: } \Phi = \frac{k' A' / \dot{C}_Z}{1 + k' A' / \dot{C}_Z} \quad (2.100)$$

$$t_S^* = t_7 + (t_H^* - t_Z) \Phi. \quad (2.101)$$

## ⑤ Probe

Die Annahme von A'' war richtig, wenn  $t_S^* = t_S$  gilt.

Für  $t_S^* > t_S$  ist A'' zu vergrößern, für  $t_S^* < t_S$  ist A'' zu verkleinern.

Eine Rechnungswiederholung beginnt ab ②.

Der Dampfstrom  $\dot{m}_{WD,1}$  ist vom Sicherheitsventil SV1 abzublasen. Wenn  $\dot{m}_{WD,1} < \dot{m}_Z$  gilt, so muß zusätzlich entsprechend Gl. (2.87) der Wasserstrom  $\dot{m}_{W,1}$  abgeführt werden.

**Zusammenfassung**

Die behandelten Einzellastfälle H1 bis H12 des Lastfalles H "Wärmezufuhr (Heizung)" sind in Tabelle 2.8 aufgelistet. Als Indizes wurden die Kennzeichen H1 bis H12 beigegeben. Sie stimmen mit den in den nachfolgenden Unterprogrammen verwendeten Größen überein.

**2.7.2. Unterprogramme**

Die Datenflußpläne für die Einzellastfälle H1 bis H12 sind in den Bildern 2.30 bis 2.41 dargestellt. Die Inhalte entsprechen vollkommen den Algorithmen des vorangegangenen Abschnittes 2.7.1. Die Bezeichnungen sind identisch. Zur Berechnung der temperatur- und druckabhängigen Zustands- und Stoffwerte dienen die im Anhang aufgeführten

Fußnote zu Tabelle 2.8

[ ] Drei mögliche Versionen sind zu unterscheiden:

$0 < \dot{m}_{WD} < \dot{m}_Z$ : Beide Masseströme ( $\dot{m}_W$ ;  $\dot{m}_{WD}$ ) gehören zum Lastfall.

$\dot{m}_{WD} \approx \dot{m}_Z$ : Es ist nur  $\dot{m}_{WD}$  vorhanden.

$\dot{m}_{WD} = 0$ : Es ist nur  $\dot{m}_W = \dot{m}_Z$  bei  $\varrho_W = \varrho_W(t)$  abzuleiten ( $t$  = Endtemperatur der Aufheizung von  $\dot{m}_Z$ ).

2) In Verbindung mit H11 oder H12 nur für  $t_H < t_S(p_{A,2})$  und mit H10 nur bei Einsatz einer zugelassenen Sicherheitstemperaturbegrenzungseinrichtung mit  $t_{\max} < t_S(p_A)$  anwendbar!

Module: **RHOW** Dichte des Wassers, **RHOS** Dichte des Sattdampfes, **TS** Sättigungstemperatur des Wassers, **DHV** spezifische Verdampfungsenthalpie, **CW** spezifische Wärmekapazität des Wassers, **DV/DT** Differentialquotient  $dv/dt$  für Wasser.

Um eine iterative Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität zu vermeiden, wurden in einigen Unterprogrammen Näherungen verwendet. So sind für das aufzuheizende Wasser in einigen Fällen  $c_W = 4200 \text{ J/(kg K)}$  angenommen worden. Für den Heizmedienstrom Wasser wurde vereinfacht  $c_H$  auf die Eintrittstemperatur bezogen ( $c_H = c_W(t_H)$ ). Für beliebige Heizmedien ist  $c_H$  eine Eingangsgröße, die als temperaturunabhängig betrachtet wird. Die Steuerung übernimmt die Kenngröße HMED.

Zur Bestimmung der Heizflächenaufteilung (Aufheizung A', Verdampfung A'') beim Speziallastfall H12 sind Iterationen notwendig. Die Anzahl der notwendigen Wiederholungen  $n$  hängt in starkem Maße von den speziellen Parametern AG,  $k'$ ,  $k''$ ,  $\dot{c}_Z$  und  $\dot{c}_H$  ab.

#### Eingabewerte (Bezugnahme auf Bilder 2.30 bis 2.41 und Tabelle 2.8)

|             |                      |                                                                                                |
|-------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{Q}_H$ | W                    | Temperaturunabhängig zugeführte Wärmeleistung                                                  |
| $t_H$       | °C                   | Konstante Temperatur des Heizmediums bei latenter Wärmeentbindung                              |
| $t_H$       | °C                   | Eintrittstemperatur des Heizmedienstromes $\dot{m}_H$ bei fühlbarer Wärmeentbindung            |
| $\dot{m}_H$ | kg/s                 | Heizmedienstrom                                                                                |
| $c_H$       | J/(kg K)             | Spezifische Wärmekapazität des Heizmediums                                                     |
| $t_Z$       | °C                   | Temperatur des Wasserzuflusses $\dot{m}_Z$                                                     |
| $\dot{m}_Z$ | kg/s                 | Wasserzufluß in den Wärmebereitsteller                                                         |
| $t_{max}$   | °C                   | Maximale Temperatur des Wassers im Behälter (Ansprechwert des Sicherheitstemperaturbegrenzers) |
| A'          | m <sup>2</sup>       | Heizfläche des Wassererwärmers                                                                 |
| A''         | m <sup>2</sup>       | Heizfläche des Wasserverdampfers                                                               |
| AG          | m <sup>2</sup>       | Gesamtheizfläche bei kombiniertem Wassererwärmer und -verdampfer ( $AG = A' + A''$ )           |
| $k'$        | W/(m <sup>2</sup> K) | Wärmedurchgangskoeffizient des Wassererwärmers                                                 |
| $k''$       | W/(m <sup>2</sup> K) | Wärmedurchgangskoeffizient des Wasserverdampfers                                               |
| HMED        | -                    | Art des Heizmediums                                                                            |
|             |                      | HMED=1 Wasser                                                                                  |
|             |                      | HMED=2 Beliebige Heizmedium                                                                    |

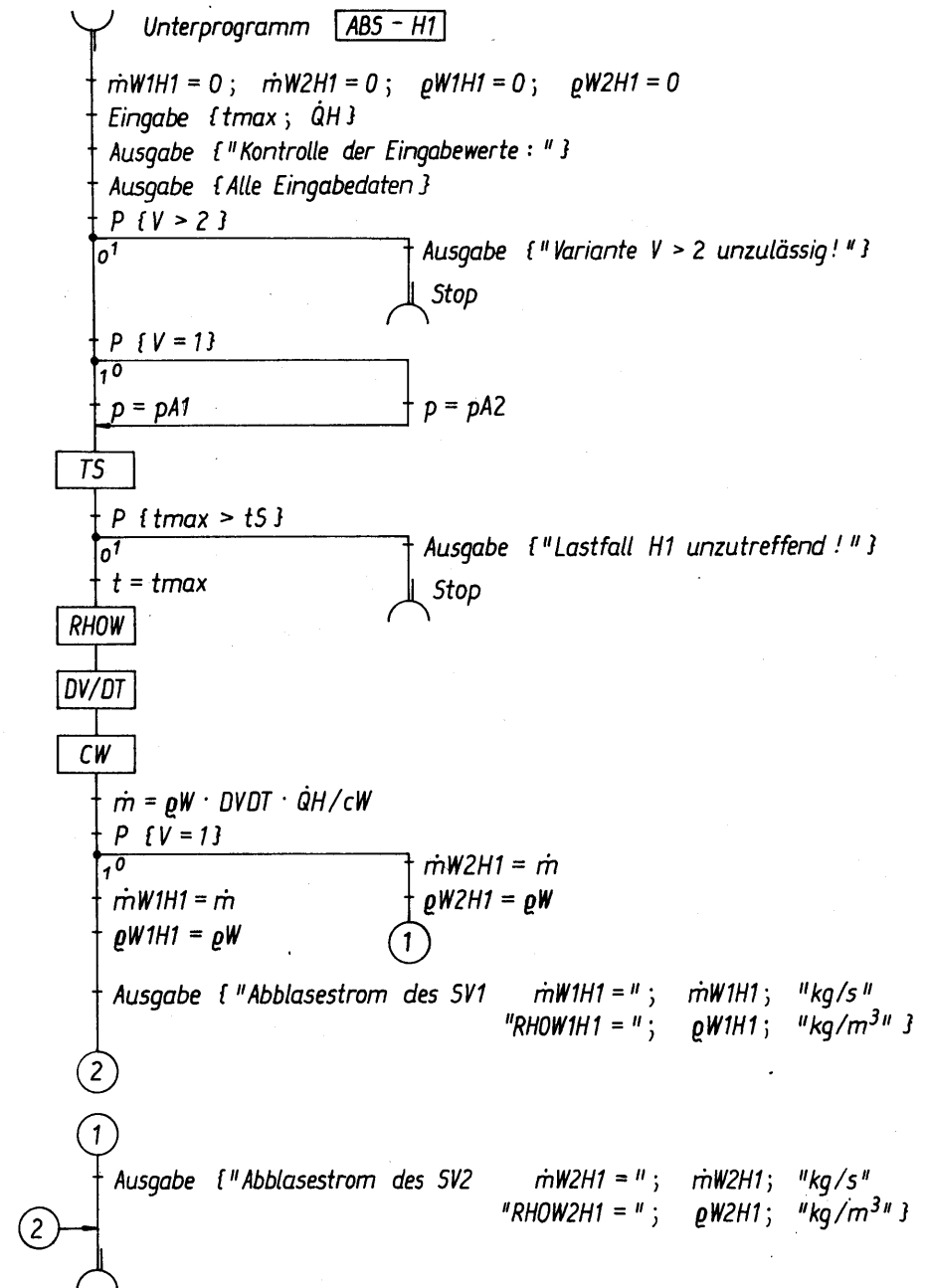
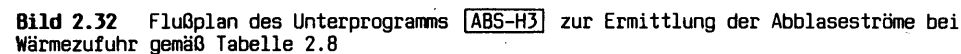
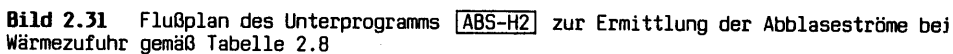
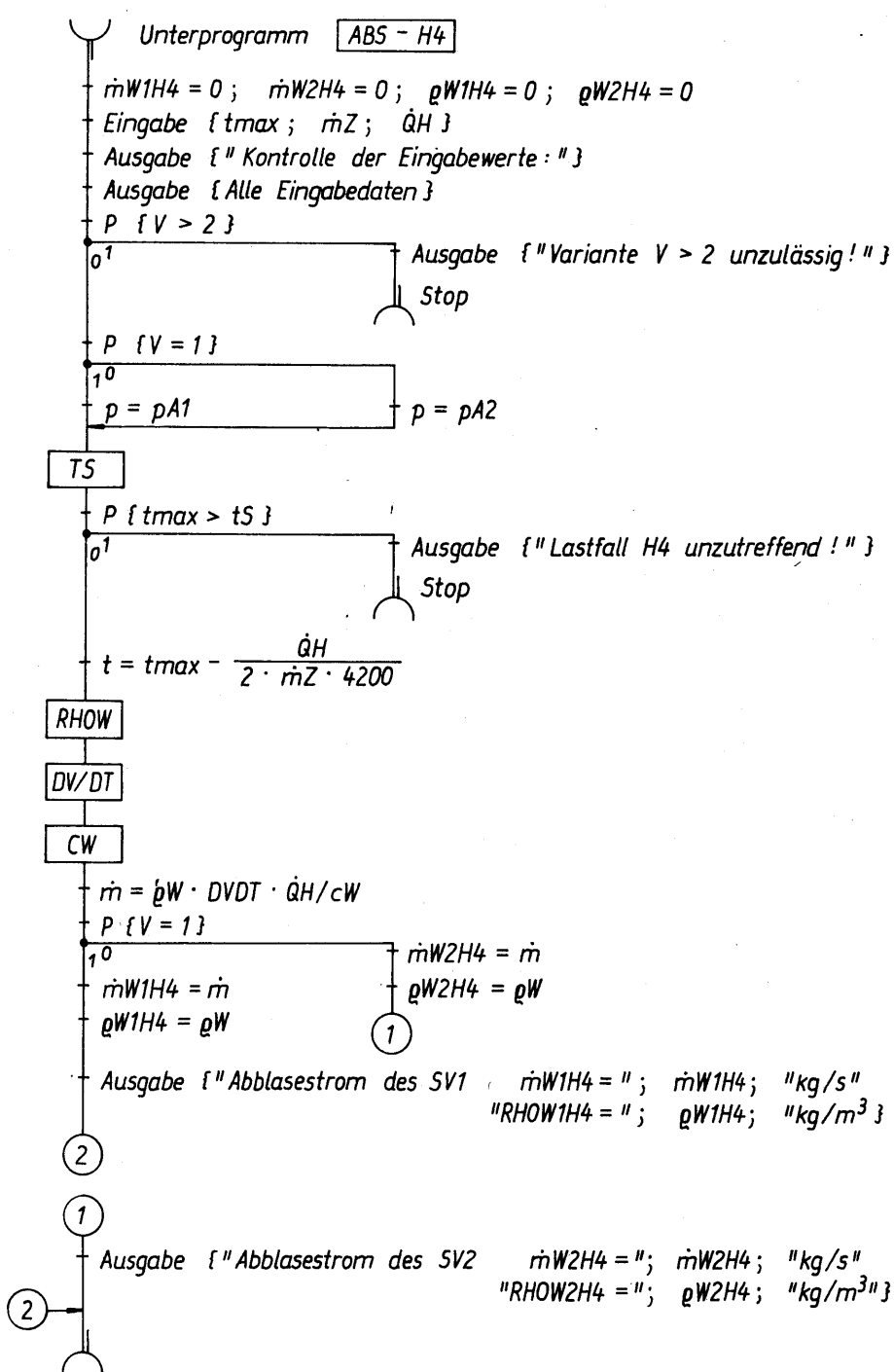
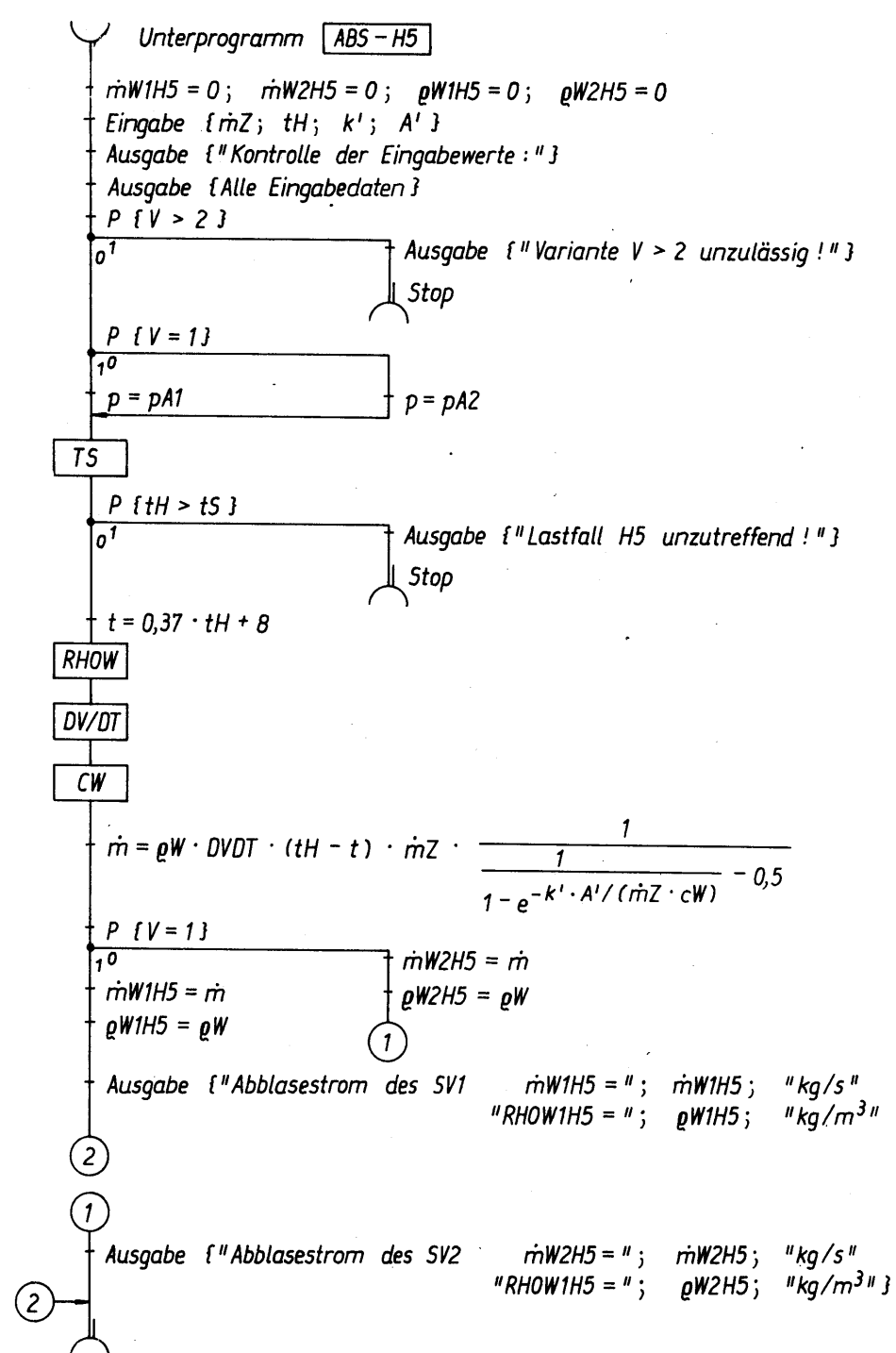


Bild 2.30 Flußplan des Unterprogramms **ABS-H1** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8

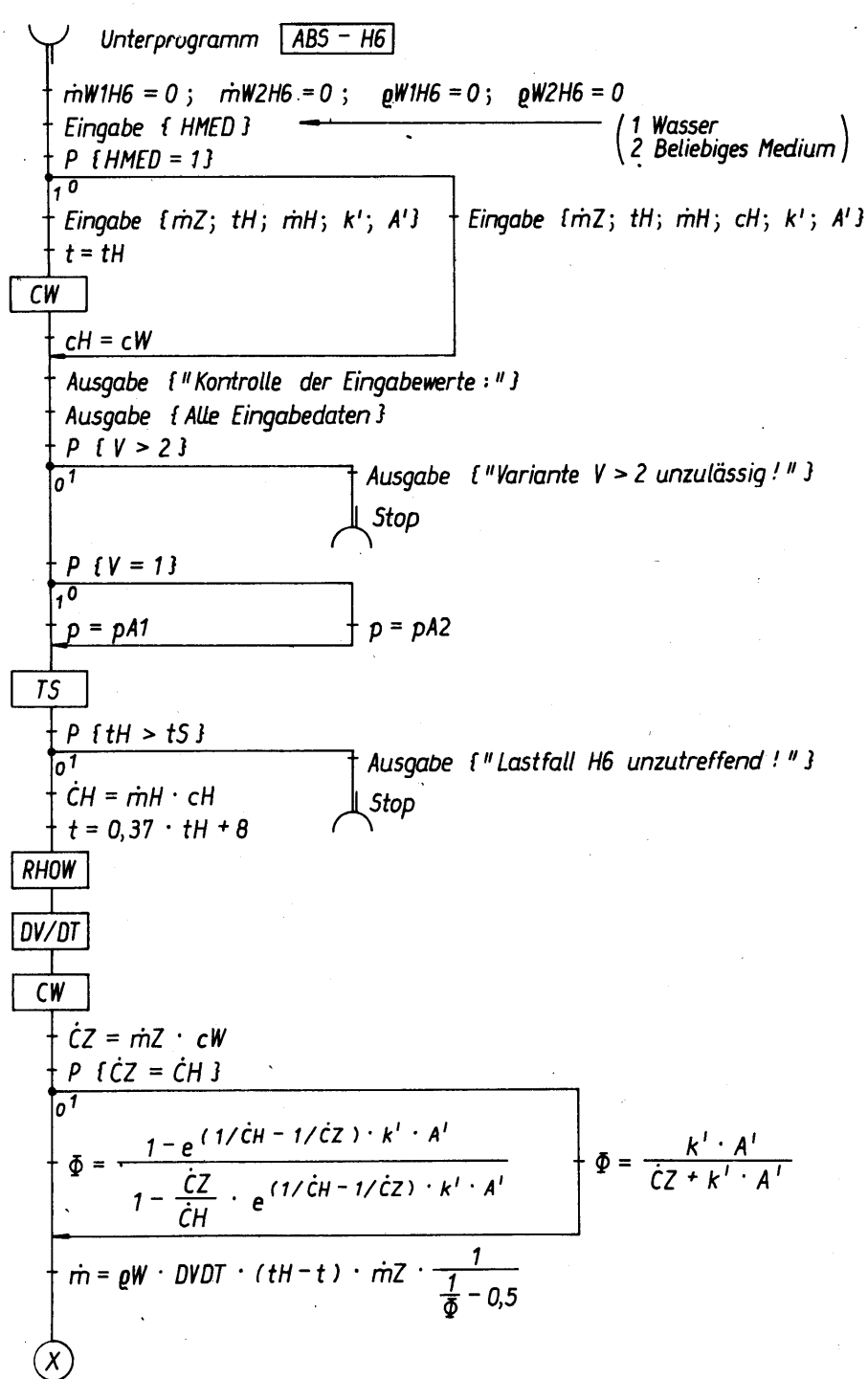




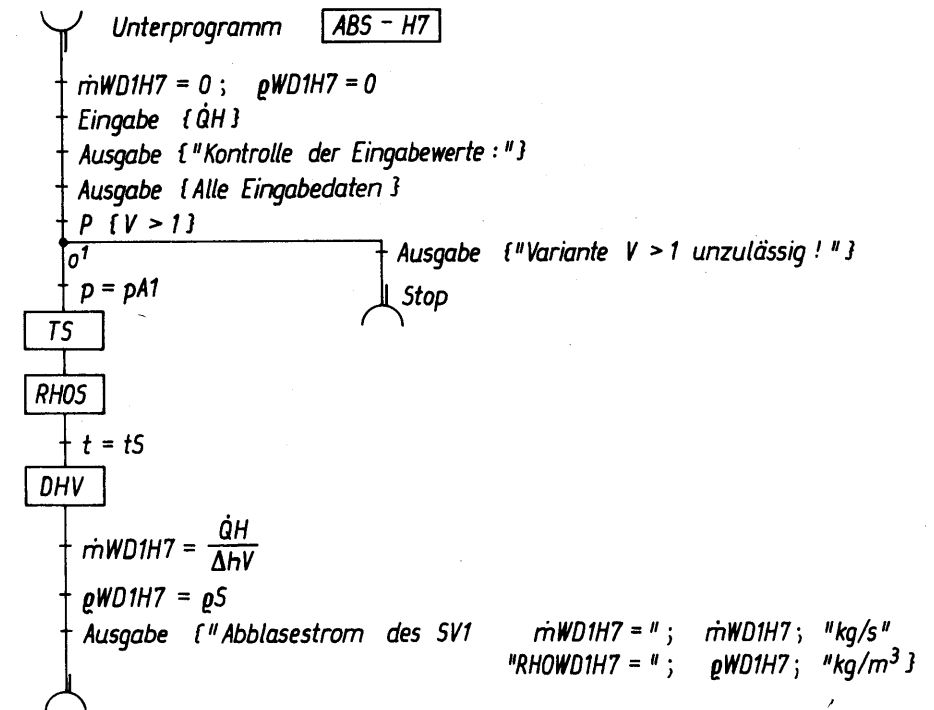
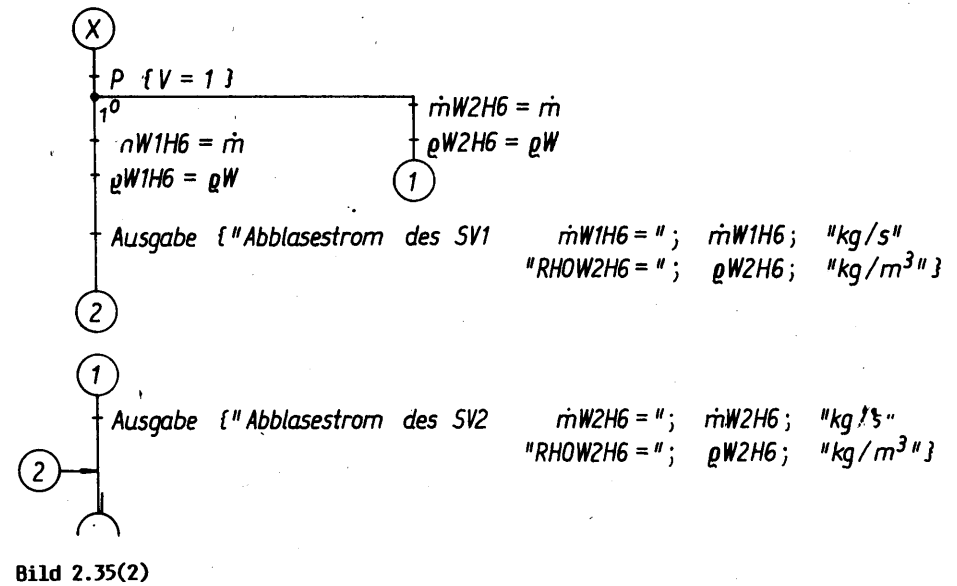
**Bild 2.33** Flußplan des Unterprogramms **ABS-H4** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8



**Bild 2.34** Flußplan des Unterprogramms **ABS-H5** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8



**Bild 2.35** Flußplan des Unterprogramms **ABS-H6** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8



**Bild 2.36** Flußplan des Unterprogramms **ABS-H7** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8

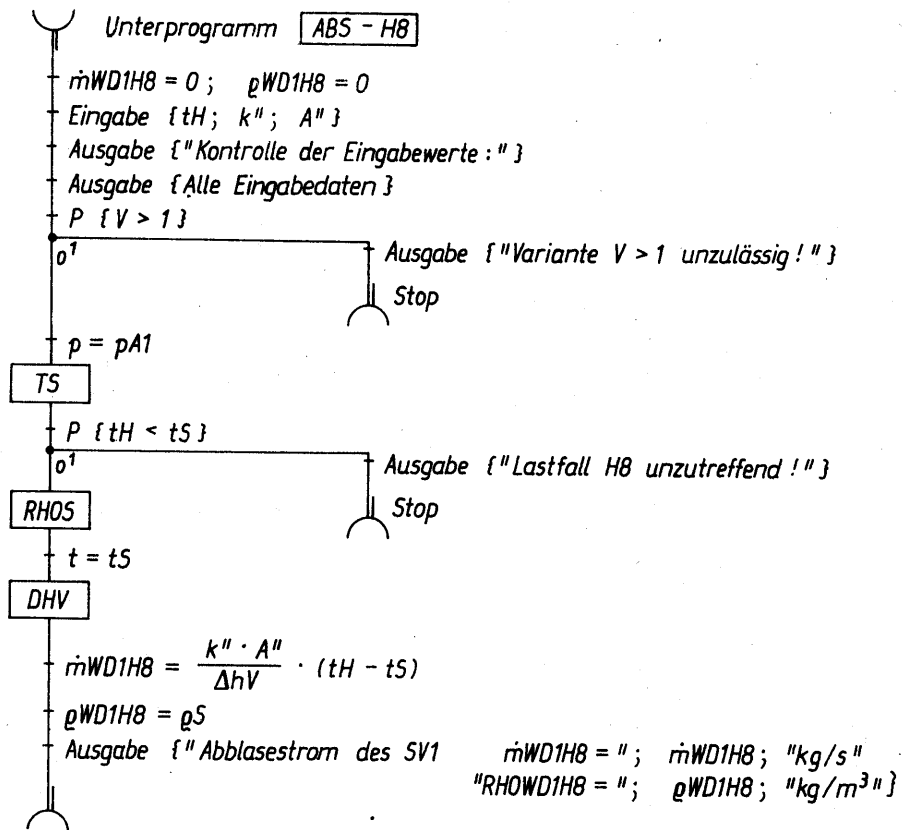


Bild 2.37 Flußplan des Unterprogramms **ABS-H8** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8

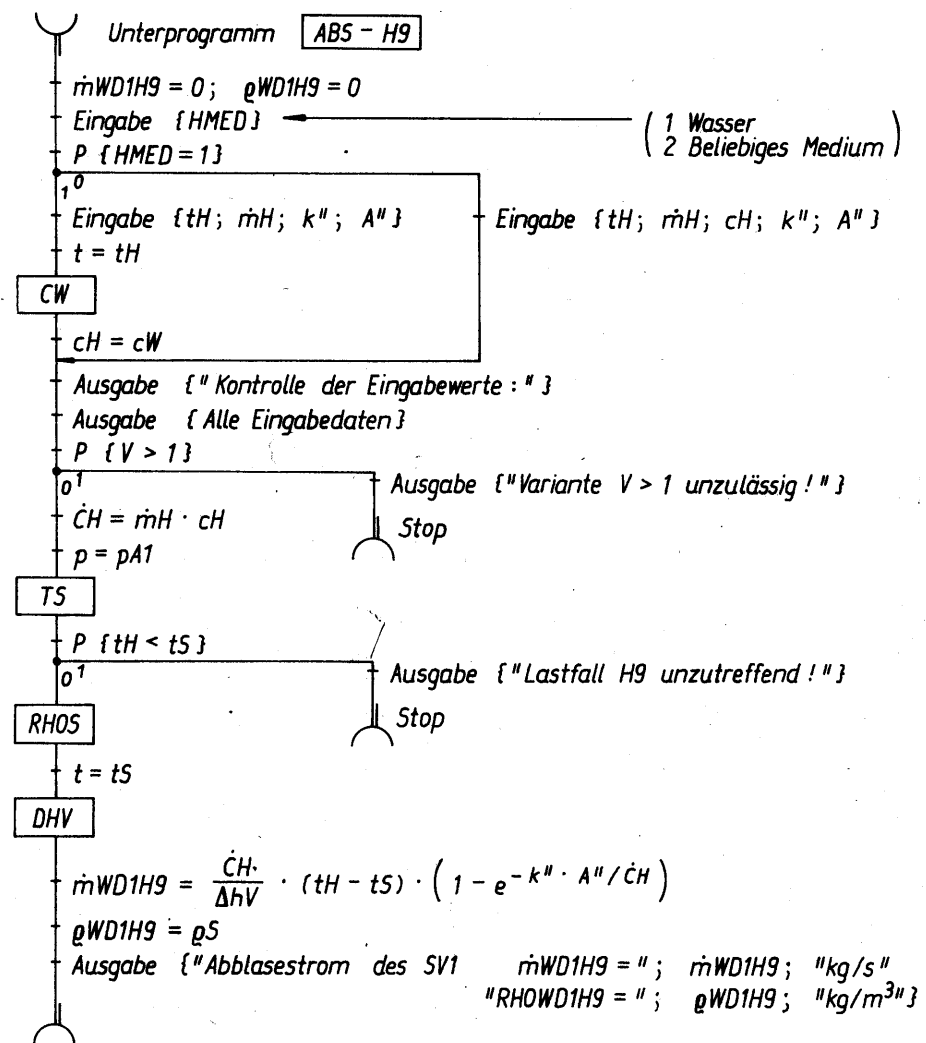


Bild 2.38 Flußplan des Unterprogramms **ABS-H9** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8

## Unterprogramm ABS - H10

$\dot{m}W1H10 = 0$ ;  $\dot{m}W2H10 = 0$ ;  $\dot{m}WD1H10 = 0$ ;  $tHSS = 0$ ;  $tHS = 0$

$\rho W1H10 = 0$ ;  $\rho W2H10 = 0$ ;  $\rho WD1H10 = 0$

Eingabe {  $\dot{m}Z$ ;  $tZ$ ;  $\dot{Q}H$  }

Ausgabe { "Kontrolle der Eingabewerte : " }

Ausgabe { Alle Eingabedaten }

P {  $V > 2$  }

0<sup>1</sup> Ausgabe { "Variante V > 2 unzulässig ! " }

Stop

P {  $V = 1$  }

1<sup>0</sup>  $p = pA1$   $p = pA2$

TS

$\dot{C}Z = \dot{m}Z \cdot 4200$

$t = tZ + \frac{\dot{Q}H}{\dot{C}Z}$

P {  $t > tS$  }

0<sup>1</sup> P {  $V = 1$  }

1<sup>0</sup> P {  $V = 1$  }

Ausgabe { "Es bildet sich Wasserdampf! Das Sicherheitsventil muß sich an der höchsten Stelle befinden. Variante 2 ist nicht zulässig ! " }

Stop

RHOW

$\dot{m}W1H10 = \dot{m}Z$

$\rho W1H10 = \rho W$ ;  $tHS = t$

Ausgabe { "Abblasestrom des SV1"  $\dot{m}W1H10 =$ ;  $\dot{m}W1H10$ ; "kg/s"  
"RHOW1H10 =";  $\rho W1H10$ ; "kg/m<sup>3</sup>" }

3

2

$t = tZ$

RHOW

$\dot{m}W2H10 = \dot{m}Z$

$\rho W2H10 = \rho W$ ;  $tHS = t$

Ausgabe { "Abblasestrom des SV2"  $\dot{m}W2H10 =$ ;  $\dot{m}W2H10$ ; "kg/s"  
"RHOW2H10 =";  $\rho W2H10$ ; "kg/m<sup>3</sup>" }

3

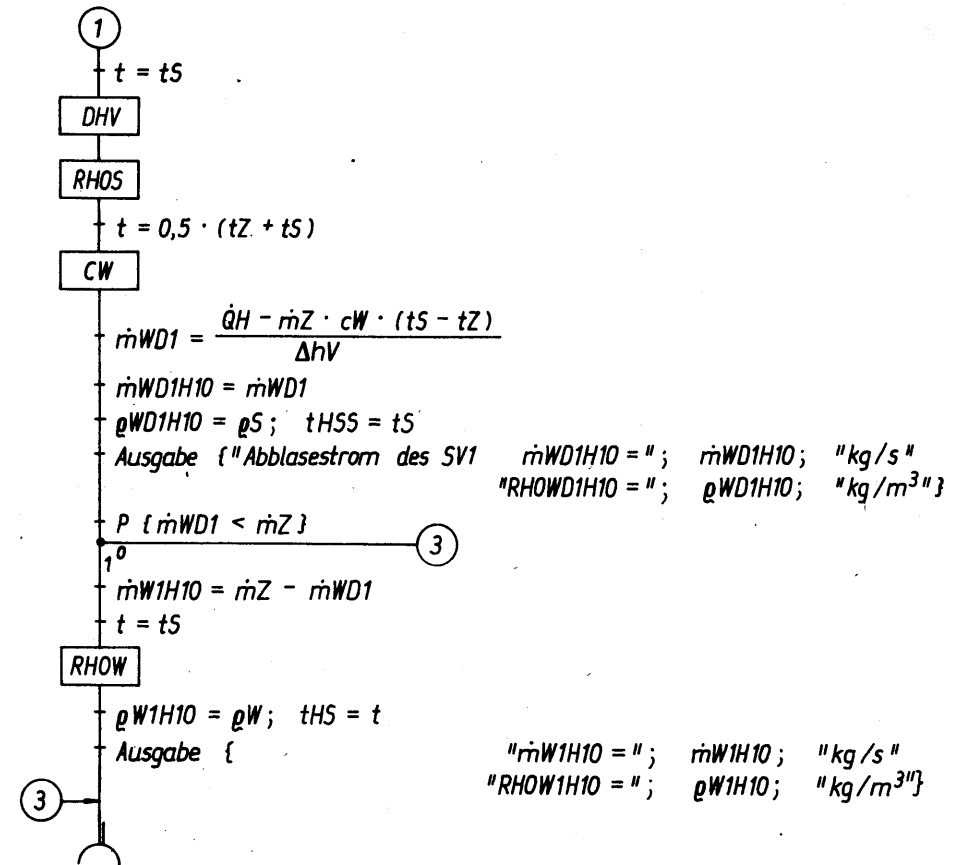
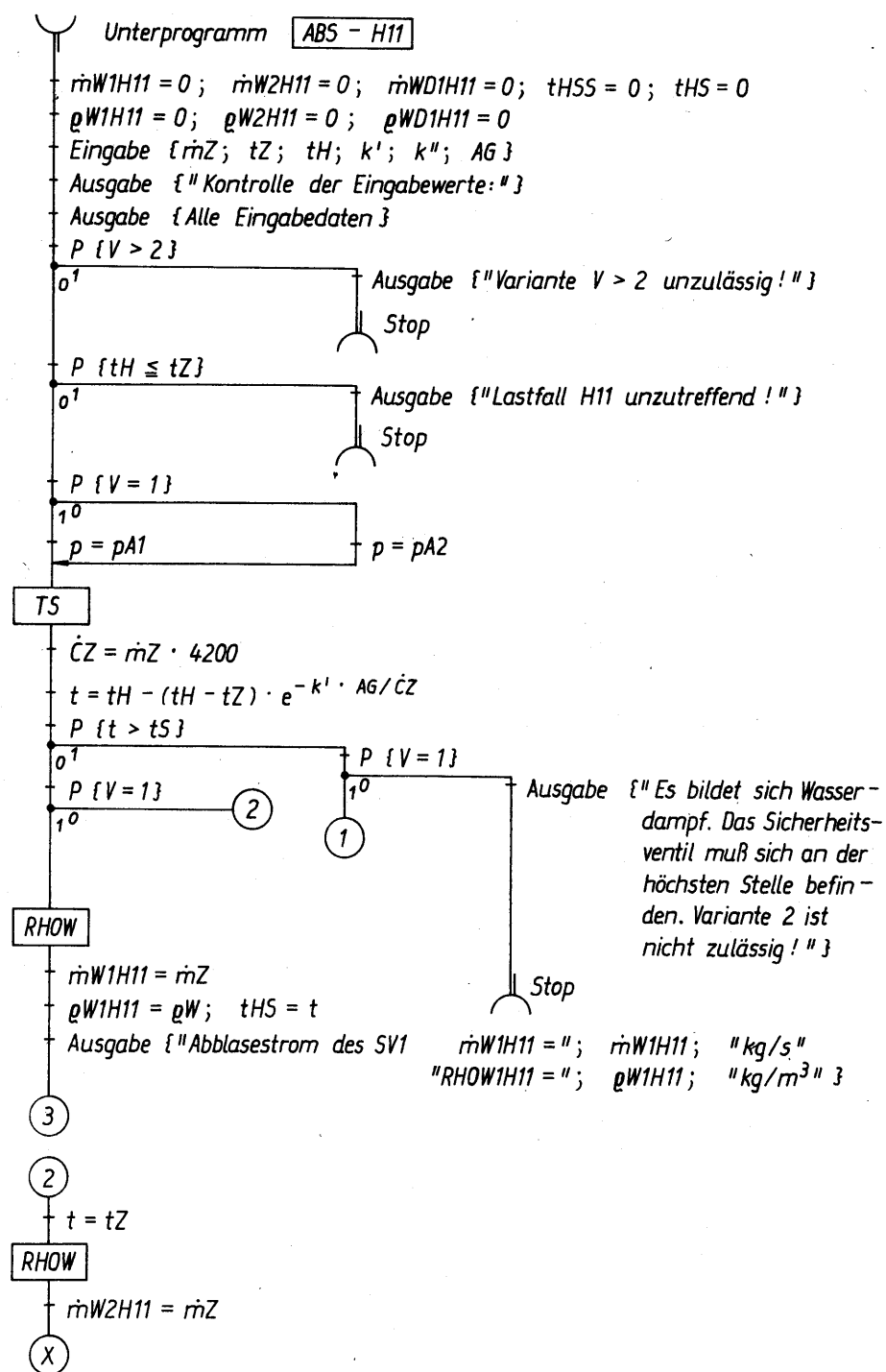
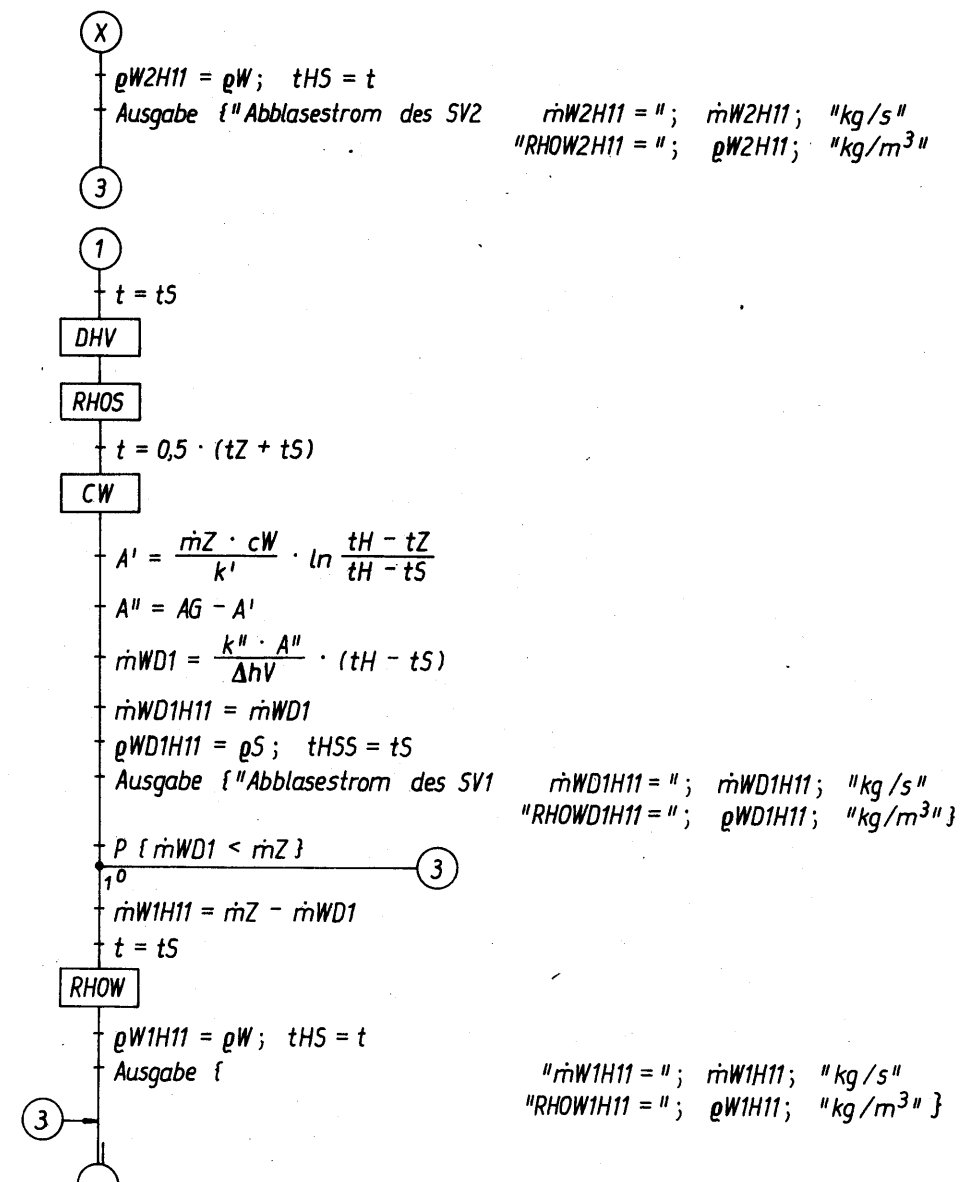


Bild 2.39(2)

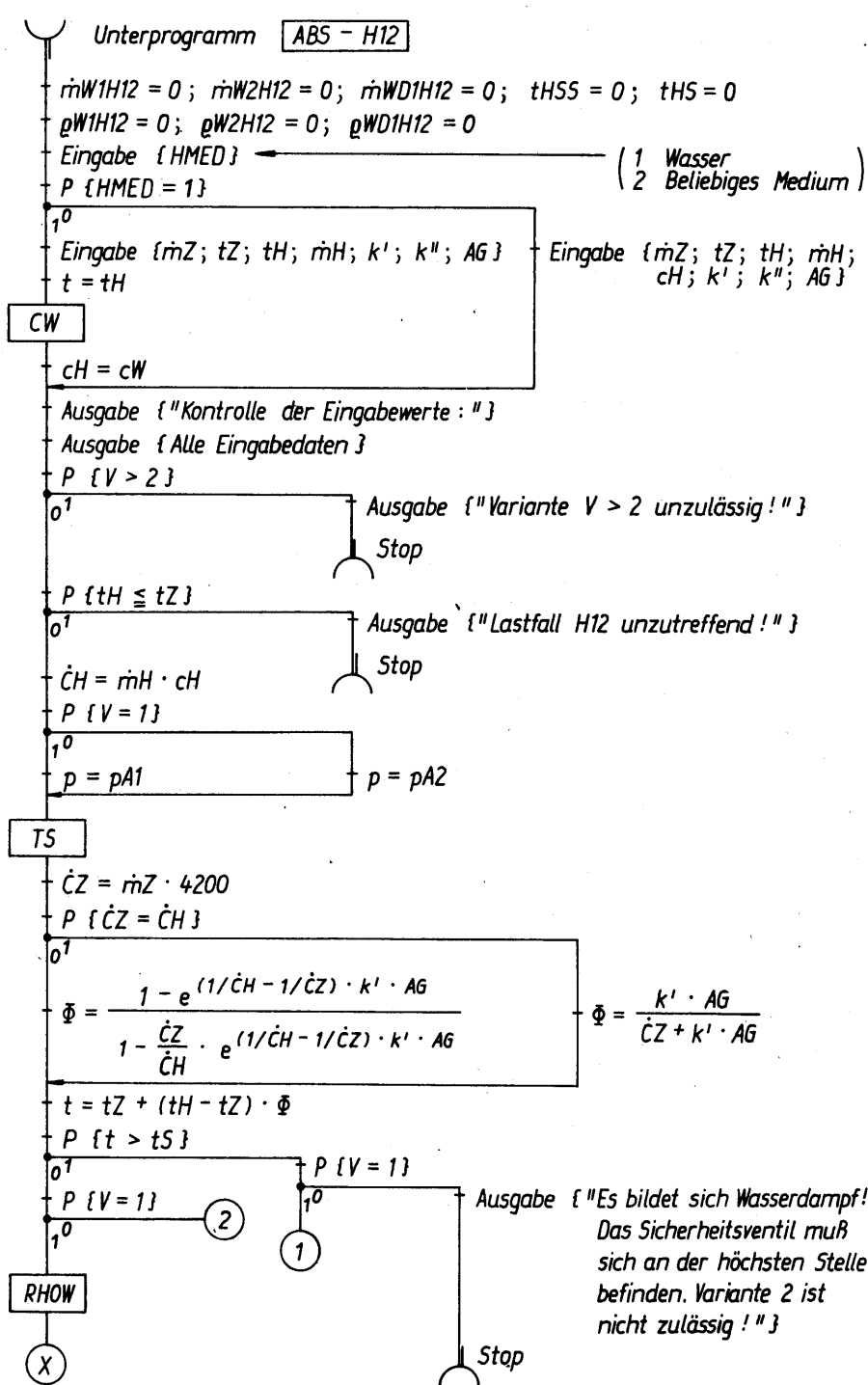
Bild 2.39 Flußplan des Unterprogramms ABS-H10 zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8



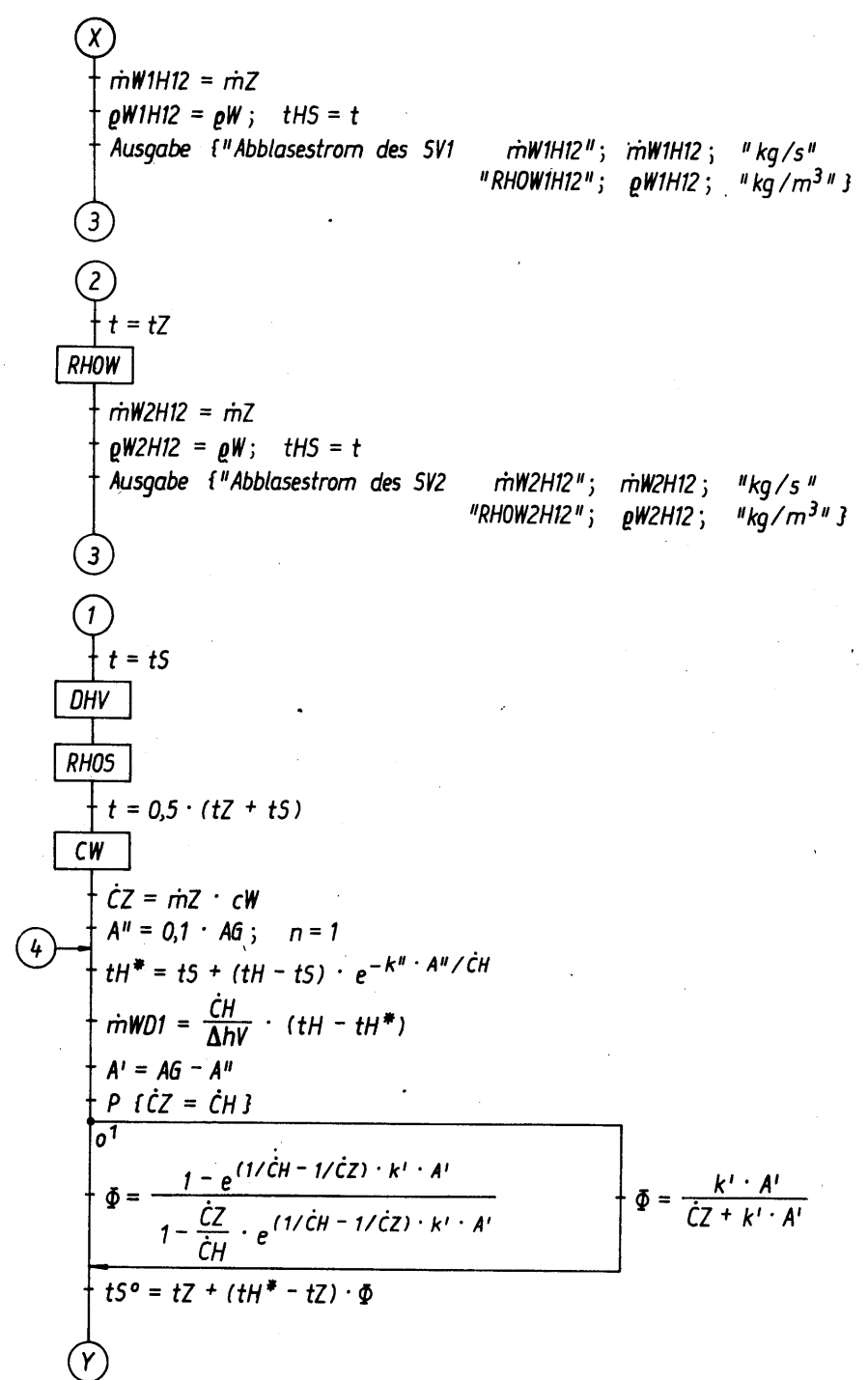
**Bild 2.40** Flußplan des Unterprogramms **ABS-H11** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8



**Bild 2.40(2)**



**Bild 2.41** Flußplan des Unterprogramms **ABS-H12** zur Ermittlung der Abblaseströme bei Wärmezufuhr gemäß Tabelle 2.8



**Bild 2.41(2)**

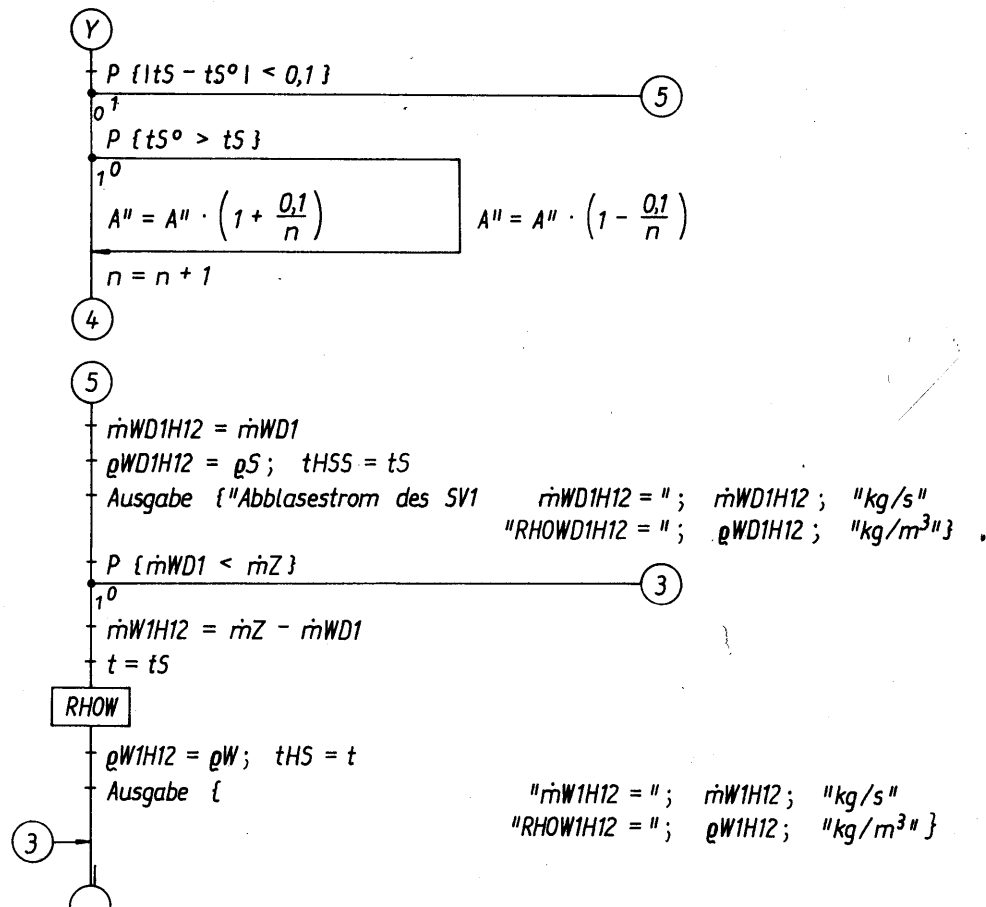


Bild 2.41(3)

### 2.7.3. Beispiele

#### Beispiel 1

Ein mittels Heizpatronen  $\dot{Q}_H = 5 \text{ kW}$  beheizter Warmwasserbereiter ist mit einem zugelassenen Sicherheitstempurbegrenzer bestückt, der bei  $t_{\max} = 70 \text{ °C}$  die Wärmezufuhr unterbindet.

Welche Belastung entsteht für ein kaltwasserseitig angeordnetes Sicherheitsventil SV2?

#### Lösung

Gemäß Aufgabenstellung handelt es sich um den Lastfall H1.

Der Abspeisestrom ergibt sich nach Gl. (2.62) zu

$$\dot{m} = \rho \frac{dv}{dt} \frac{\dot{Q}_H}{c}$$

Für die Temperatur  $t_{\max} = 70 \text{ °C}$  gelten nach /7/ bzw. Gln. (A1), (A13) und (A12)

$$\rho = 978 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{dv}{dt} = 0,60 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{kg K})$$

$$c = 4190 \text{ J/(kg K)}$$

oder Tabelle 2.7

$$\rho \frac{dv}{dt} = 587 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Damit kann der Massestrom, den SV2 abspeisen muß, berechnet werden:

$$\dot{m}_{W,2} = 587 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{5000}{4190} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Die zugehörige Dichte beträgt:

$$\rho_{W,2} = 978 \text{ kg/m}^3$$

Das nachfolgende Rechnerprotokoll ist das Ergebnis der Abarbeitung des Lastfalles H1 nach Bild 2.30:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E |       | Festlegung der Ansprechdrücke |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>  |       |                               |
| Absicherungsvariante                | V =   | 2                             |
| Steuergröße                         | SG =  | 1                             |
| Gegebener Ansprechdruck für SV2     | pA2 = | 0.8500 MPa                    |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2     | H2 =  | 10.000 m                      |
| Behälterfüllung                     | W =   | 1.0                           |

| LF:ABS-H1 Konst. Heizleistung bei Temp.-begrenzung/Abgesperrter Wasserbehälter    |           |        |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                                |           |        |       |
| Max. Temperatur des Wassers im Behälter (Ansprechwert-Sicherheitstempurbegrenzer) | tmax =    | 70     | °C    |
| Konstant zugeführte Wärmeleistung                                                 | QH =      | 5000   | W     |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                                |           |        |       |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                                                  | mW2H1 =   | 0.0007 | kg/s  |
| Dichte                                                                            | RHOW2H1 = | 978.2  | kg/m³ |

**Beispiel 2**

Das Heiznetz eines Industriekomplexes ist mit einem Wärmeübertrager ausgerüstet, der im Vollastfall bei den Temperaturen

Primäreintritt 160 °C; Primäraustritt 80 °C

Sekundäreintritt 70 °C; Sekundäraustritt 130 °C

arbeitet. Der maximale Primärdurchsatz beträgt  $\dot{m}_H = 60$  kg/s. Das Sekundärnetz ist durch ein Sicherheitsventil SV1 mit  $p_{A,1} = 2$  MPa druckmäßig abgesichert.

Der maximale Ausdehnungsvolumenstrom, der beim Aufheizen des Netzes abzuführen ist, soll bestimmt werden, wenn der maximale Sekundärmassestrom  $\dot{m}_Z = 85$  kg/s sein kann.

**Lösung**

Die Analyse der Aufgabenstellung ergibt den Lastfall H6. Aus den gegebenen Vollastparametern

$$\dot{m}_H c_H \Delta t_H = k' A' \Delta t_m$$

folgt

$$\frac{k' A'}{\dot{C}_H} = \frac{\Delta t_H}{\Delta t_m} = \frac{160 - 80}{\frac{30 - 10}{\ln \frac{30}{10}}} = 4,394.$$

Im Falle gereinigter Heizflächen wird zur Sicherheit ein Zuschlag von 30 % gewählt, so daß für die weitere Rechnung

$$\frac{k' A'}{\dot{C}_H} = 5,713 \text{ gilt.}$$

Die Wärmeübertragung ist am größten, wenn der Wärmekapazitätsstrom des Primärmediums ein Maximum aufweist. Deshalb wird mit

$$\dot{C}_H = 60 \cdot 4334 \text{ W/K} = 260040 \text{ W/K}$$

gerechnet, womit

$$k' A' = 5,713 \cdot 260040 \text{ W/K} = 1485609 \text{ W/K}$$

folgt.

Die mittlere Aufheiztemperatur  $t$ , die zur größten Volumenexpansion führt, ergibt sich nach Gl. (2.63) zu

$$t = (0,37 \cdot 160 + 8) \text{ °C} = 67,2 \text{ °C}.$$

Nach Auswertung der Gln. (A1) und (A13), der Wasserdampf tafeln oder der Tabelle 2.7 folgt

$$\varrho \frac{dv}{dt} = 571 \cdot 10^{-6} \text{ l/K.}$$

Der abzuspeisende Massestrom berechnet sich nach den Gln. (2.74) und (2.76). Nach Einsetzen der bekannten Größen lauten diese:

$$\Phi = \frac{1 - \exp \left[ (1/260040 - 1/\dot{C}_Z) \cdot 1485609 \right]}{1 - \frac{\dot{C}_Z}{260040} \exp \left[ (1/260040 - 1/\dot{C}_Z) \cdot 1485609 \right]}$$

$$\dot{m}_{W,1} = 571 \cdot 10^{-6} \cdot (160 - 67,2) \dot{m}_Z \frac{1}{\frac{1}{\Phi} - 0,5}$$

Weiter gilt der Zusammenhang

$$\dot{C}_Z = 4190 \dot{m}_Z.$$

Da nicht von vornherein festliegt, welches  $\dot{m}_Z$  zum maximalen Abspeisestrom  $\dot{m}_{W,1}$  führt, werden verschiedene  $\dot{m}_Z = (0 \dots 85)$  kg/s untersucht. Die Ergebnisse sind tabellarisch wiedergegeben:

| $\dot{m}_Z$ in kg/s     | 85   | 80   | 75   | 70   | 65   | 60   | 55   | 50   |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\dot{m}_{W,1}$ in kg/s | 4,64 | 4,71 | 4,77 | 4,83 | 4,86 | 4,87 | 4,82 | 4,69 |

Damit beträgt die größte Belastung des Sicherheitsventils SV1

$$\dot{m}_{W,1} = 4,87 \text{ kg/s}$$

bei der Dichte

$$\varrho_{W,1} = 980 \text{ kg/m}^3.$$

Die Berechnung nach Unterprogramm H6 (Bild 2.35) liefert die nachfolgenden Protokolle. Die Abweichungen werden durch die Approximationen  $\varrho dv/dt$  verursacht:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E |       | Festlegung der Ansprechdrücke |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>  |       |                               |
| Absicherungsvariante                | V =   | 1                             |
| Steuergröße                         | SG =  | 1                             |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1     | pA1 = | 2.0000 MPa                    |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1     | H1 =  | 2.000 m                       |
| Behälterfüllung                     | W =   | 1.0                           |

| LF:ABS-H6 Wasserbeheizte Heizfläche/Geschlossener Kreislauf |                  |
|-------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                          |                  |
| Art des Heizmediums                                         | HMED = 1         |
| Wasserzufluß in den Wärmebereitsteller                      | mZ = 85.000 kg/s |
| Eintrittstemperatur des Heizmedienstromes                   | tH = 160 °C      |
| Heizmedienstrom                                             | mH = 60.000 kg/s |

|                                           |                      |                       |
|-------------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wassererwärmer | $k' = 2000$          | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| Heizfläche des Wassererwärmers            | $A' = 742.800$       | m <sup>2</sup>        |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                        |                      |                       |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom          | $m_{W1H6} = 4.7099$  | kg/s                  |
| Dichte                                    | $R_{HOW1H6} = 979.7$ | kg/m <sup>3</sup>     |

| LF:ABS-H6 Wasserbeheizte Heizfläche/Geschlossener Kreislauf |                      |                       |
|-------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                          |                      |                       |
| Art des Heizmediums                                         | HMED = 1             |                       |
| Wasserzufluß in den Wärmebereitsteller                      | $m_Z = 60.000$       | kg/s                  |
| Eintrittstemperatur des Heizmedienstromes                   | $t_H = 160$          | °C                    |
| Heizmedienstrom                                             | $m_H = 60.000$       | kg/s                  |
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wassererwärmer                   | $k' = 2000$          | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| Heizfläche des Wassererwärmers                              | $A' = 742.800$       | m <sup>2</sup>        |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                          |                      |                       |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                            | $m_{W1H6} = 4.9360$  | kg/s                  |
| Dichte                                                      | $R_{HOW1H6} = 979.7$ | kg/m <sup>3</sup>     |

| LF:ABS-H6 Wasserbeheizte Heizfläche/Geschlossener Kreislauf |                      |                       |
|-------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                          |                      |                       |
| Art des Heizmediums                                         | HMED = 1             |                       |
| Wasserzufluß in den Wärmebereitsteller                      | $m_Z = 50.000$       | kg/s                  |
| Eintrittstemperatur des Heizmedienstromes                   | $t_H = 160$          | °C                    |
| Heizmedienstrom                                             | $m_H = 60.000$       | kg/s                  |
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wassererwärmer                   | $k' = 2000$          | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| Heizfläche des Wassererwärmers                              | $A' = 742.800$       | m <sup>2</sup>        |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                          |                      |                       |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                            | $m_{W1H6} = 4.7487$  | kg/s                  |
| Dichte                                                      | $R_{HOW1H6} = 979.7$ | kg/m <sup>3</sup>     |

### Beispiel 3

Ein kohlegefeuerter Heißwasserkessel ist mit einem Sicherheitsventil SV1 ( $p_{A,1} = 1,0$  MPa) abgesichert. Die angegebene Wärmeleistung  $\dot{Q}_H = 1$  MW kann nach den Ergebnissen einer Versuchserprobung kurzzeitig um etwa 25 % überschritten werden, wenn besonders günstige Bedingungen vorliegen.

Wie groß ist der abzublaseende Dampfstrom?

### Lösung

An die den Feuerraum umgebende Heizfläche wird die Wärme zu einem maßgeblichen Teil durch Strahlung übertragen. Aufgrund der hohen Feuerraumtemperatur ist dieser Wärmestrom nahezu unabhängig von der Medientemperatur konstant. Bei der anschließenden Rauchgaskühlung handelt es sich um eine fühlbare Wärmeentbindung gemäß Lastfall H9,

wobei die Temperatur des Wassers bzw. Dampfes und die Wärmeübergangsbedingungen von großer Bedeutung sind.

Zur vereinfachten Behandlung wird der Lastfall H7, d.h. eine konstante Wärmezufuhr von  $\dot{Q}_H = 1,25$  MW, als zutreffend angenommen. Man befindet sich damit auf der "sicheren" Seite.

Für den Abblasedruck gelten:

$$t_S = 180 \text{ °C}$$

$$\Delta h_V = 2014 \text{ kJ/kg}$$

$$\rho_S = 5,15 \text{ kg/m}^3.$$

Die Gl. (2.77) ergibt den abzuleitenden Wasserdampfstrom

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{1,25 \cdot 10^6}{2014 \cdot 10^3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,62 \text{ kg/s}$$

bei der Dichte

$$\rho_{WD,1} = 5,15 \text{ kg/m}^3.$$

Die automatisierte Ermittlung gemäß Unterprogramm - Bild 2.36 - liefert das nachfolgende Protokoll:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E | Festlegung der Ansprechrücke |
|-------------------------------------|------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>  |                              |
| Absicherungsvariante                | V = 1                        |
| Steuergröße                         | SG = 1                       |
| Gegebener Ansprechrückdruck für SV1 | $p_{A1} = 1.0000$ MPa        |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1     | H1 = 2.000 m                 |
| Behälterfüllung                     | W = 1.0                      |

| LF:ABS-H7 Konstante Heizleistung/Abgesperrter Verdampfer |                       |                   |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| <b>KONTROLLE DES EINGABEWERTES:</b>                      |                       |                   |
| Konstant zugeführte Wärmeleistung                        | $\dot{Q}_H = 1250000$ | W                 |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                       |                       |                   |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                         | $m_{WD1H7} = 0.6208$  | kg/s              |
| Dichte                                                   | $R_{HOWD1H7} = 5.1$   | kg/m <sup>3</sup> |

### Beispiel 4

Ein Wärmeübertrager sei mit  $p_{A,1} = 0,4$  MPa abgesichert. Er wird primärseitig mit Heißwasser ( $t_H = 160$  °C;  $\dot{m}_H = 16$  kg/s) beaufschlagt. Die genannte Eintrittstemperatur und der Massestrom stellen Maximalwerte dar, die bei Ausfall der Temperaturregelung über längere Zeit konstant gelten. Sekundärseitig werden gemäß Pumpenbetriebs-

punkt bei abgesperrtem Vorlauf  $\dot{m}_Z = 8 \text{ kg/s}$  eingespeist und über SV1 abgeleitet. Die Temperatur des Zuflusses beträgt  $t_Z = 80^\circ\text{C}$ .

Es sind die Lastannahmen - Wasser und evtl. Wasserdampf - für das Sicherheitsventil zu ermitteln.

Für saubere Wärmeübertragerflächen können in diesem speziellen Fall folgende Wärmedurchgangskoeffizienten erwartet werden:

Heizmedium - Wasser  $k' = 1500 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

Heizmedium - Dampf  $k'' = 3400 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

Die Gesamtheizfläche beträgt  $A_G = 140 \text{ m}^2$ .

### Lösung

Es liegt der Lastfall H12 vor. Für den Fall, daß keine Dampfbildung auftritt, ergibt sich eine Austrittstemperatur des Zuspaisstromes nach den Gln. (2.94) und (2.95).

Es berechnen sich schrittweise:

$$\left. \begin{aligned} \dot{C}_H &= 16 \cdot 4334 \text{ W/K} = 69344 \text{ W/K} \\ \dot{C}_Z &= 8 \cdot 4200 \text{ W/K} = 33600 \text{ W/K} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Die spezifischen Wärmekapazitäten} \\ \text{wurden näherungsweise bei Eintritts-} \\ \text{temperatur gebildet.} \end{array}$$

$$\exp \left[ \left( \frac{1}{69344} - \frac{1}{33600} \right) \cdot 1500 \cdot 140 \right] = 0,040$$

$$\Phi = \frac{1 - 0,040}{1 - \frac{33600}{69344} \cdot 0,040} = 0,979$$

$$t = 80^\circ\text{C} + (160 - 80) \cdot 0,979 \text{ K} = 158,3^\circ\text{C}.$$

Die zum Ansprechdruck  $p_{A,1} = 0,4 \text{ MPa}$  gehörige Sättigungstemperatur beträgt  $t_S = 143,6^\circ\text{C}$ . Da die theoretische Austrittstemperatur  $t$  darüber liegt, wird in Wirklichkeit Verdampfung bzw. Teilverdampfung auftreten. Die spezifische Verdampfungsenthalpie beträgt  $\Delta h_v = 2134 \text{ kJ/kg}$ .

Unter Annahme von  $A''$  sind die Gln. (2.96) bis (2.101) wiederholt durchzurechnen. Es gelten die Schritte:

$$t_H^* = \left[ 143,6 + (160 - 143,6) \cdot e^{-3400 \cdot A''/69344} \right]^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_{WD,1} = \frac{69344}{2134 \cdot 10^3} (160 - t_H^*) \text{ kg/s}$$

$$A' = (140 - A'') \text{ m}^2$$

$$E = \exp \left[ \left( \frac{1}{69344} - \frac{1}{33600} \right) \cdot 1500 \cdot A' \right]$$

$$\Phi = \frac{1 - E}{1 - \frac{33600}{69344} E}$$

$$t_S^0 = \left[ 80 + (t_H^* - 80) \Phi \right]^\circ\text{C}.$$

Mit einem programmierbaren Taschenrechner ist die Auswertung leicht möglich. Es ergeben sich die nachfolgenden Zuordnungen:

| $A''$ in $\text{m}^2$       | 10    | 20    | 30    | 40    | 35    | 34    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_S^0$ in $^\circ\text{C}$ | 151,7 | 147,4 | 144,5 | 142,3 | 143,3 | 143,6 |

Für  $A'' = 34 \text{ m}^2$  stimmen  $t_S^0$  und  $t_S$  überein. Die weiteren Ergebnisse lauten:

$$\begin{aligned} t_H^* &= 146,7^\circ\text{C} & \Phi &= 0,953 \\ \dot{m}_{WD,1} &= 0,432 \text{ kg/s} & A' &= 106 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Damit muß das Sicherheitsventil die Masseströme

Wasserdampf  $\dot{m}_{WD,1} = 0,432 \text{ kg/s}$

Wasser  $\dot{m}_{W,1} = (8 - 0,432) \text{ kg/s} = 7,568 \text{ kg/s}$

abführen. Die Dichten betragen:

Wasserdampf  $\rho_{WD,1} = 2,163 \text{ kg/m}^3$

Wasser  $\rho_{W,1} = 922,6 \text{ kg/m}^3$

Das nachfolgende Rechnerprotokoll gibt die Ergebnisse bei Abarbeitung des Unterprogramms H12 (Bild 2.41) an.

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E |       | Festlegung der Ansprechdrücke |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>  |       |                               |
| Absicherungsvariante                | V =   | 1                             |
| Steuergröße                         | SG =  | 1                             |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1     | pA1 = | 0.4000 MPa                    |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1     | H1 =  | 2.000 m                       |
| Behälterfüllung                     | W =   | 1.0                           |

| LF: ABS-H12 Wasserheizfläche/Erwärmung, Verdampfung des Wasserzuflusses        |             |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                             |             |                           |
| Art des Heizmediums                                                            | HMED =      | 1                         |
| Wasserzufluß in den Wärmebereitsteller                                         | mZ =        | 8.000 kg/s                |
| Temperatur des Wasserzuflusses mZ                                              | tZ =        | 80 $^\circ\text{C}$       |
| Eintrittstemperatur des Heizmedienstromes                                      | tH =        | 160 $^\circ\text{C}$      |
| Heizmedienstrom                                                                | mH =        | 16.000 kg/s               |
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wassererwärmer                                      | k' =        | 1500 W/(m <sup>2</sup> K) |
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wasserverdampfer                                    | k'' =       | 3400 W/(m <sup>2</sup> K) |
| Gesamtheizfläche bei kombiniertem Wassererwärmer und -verdampfer AG = A' + A'' | AG =        | 140.000 m <sup>2</sup>    |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                             |             |                           |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                                               | mWD1H12 =   | 0.4246 kg/s               |
| Dichte                                                                         | RHOWD1H12 = | 2.170 kg/m <sup>3</sup>   |
| Massestrom                                                                     | mW1H12 =    | 7.5754 kg/s               |
| Dichte                                                                         | RHOW1H12 =  | 922.9 kg/m <sup>3</sup>   |

### 3. Lastzuordnungen für Sicherheitsvorrichtungen in Anlagen

Für die **Anlage**, sei es ein Heizsystem oder ein Verteilungsnetz (Dampf, Druckluft, Wasser), ist stets - wie bereits eingangs gefordert - ein **Gesamtsicherungskonzept** zu erstellen.

Derzeit bezieht sich die **Anlagensicherung** vor allem auf den Einsatz von **Sicherheitsventilen**, die an verschiedenen Anlagenteilen installiert und auf differenzierte **Ansprechdrücke** eingestellt werden.

- Während die Ermittlung der Lastfälle (Abschnitt 2.) nach feststehenden Algorithmen, die in rechtechnisch abarbeitbare Unterprogramme gefaßt werden, nahezu rezeptartig erfolgen kann, stellt das Zuordnen der Lastfälle eine typische Ingenieurarbeit dar. Sie muß ideenreich erfolgen. Das Ergebnis - einschließlich der getroffenen technischen Kompromisse - ist überprüfbar darzustellen.
- Die Lastzuordnungen lassen sich nur in Sonderfällen, d.h. für feste Anlagenkonfigurationen, algorithmieren. Eine allgemeingültige, beispielsweise für alle Heizungsanlagen zutreffende Darstellung würde zu viele Freiheitsgrade aufweisen. Außerdem sollten dem Ingenieur bewußt Aussagen über die zu beachtenden Lastfälle abverlangt werden, damit sicherheitstechnische Konzepte nicht in Schematismus abgleiten, sondern stets neu zu überdenken sind.
- Das Beachten der nachfolgenden **Prämissen** kann in vielen Fällen beim Erstellen des Sicherungskonzeptes hilfreich sein:
  - Je kleiner die Anzahl der Sicherheitsventile in der Anlage, um so übersichtlicher und eindeutiger gestaltet sich die Zuordnung der Lastfälle.
  - Die Lastfälle sind den installierten Sicherheitsventilen bevorzugt nach dem Verursacherprinzip zuzuweisen.
  - Die Ansprechdrücke der Sicherheitsventile sollten sich auf das druckmäßig schwächste Bauteil beziehen, so daß jeder relevante Lastfall nur jeweils einem Sicherheitsventil zugeordnet werden muß.

Zukünftig bedarf es einer entschiedenen technischen Weiterentwicklung der Sicherheitsvorrichtungen und -einrichtungen sowie des festen Einbeziehens von typgeprüften Verriegelungs- und Begrenzungsschaltungen in das Sicherungskonzept einer Anlage.

- Während das Abblasen über ein Sicherheitsventil ein Anlagenteil, z.B. einen Behälter, wirksam vor unzulässigem Innendruck schützt, führt der Medienverlust oftmals zu einem instabilen Anlagenbetrieb.

- Die Grenzen der punktuellen Druckbegrenzung zur Absicherung der Gesamtanlage zeigen sich deutlich bei der Überlagerung der Abblasedrücke und der Druckschaubilder (Abschnitt 3.1.4.).

### 3.1. Anschlußorte und Ansprechdrücke der Sicherheitsvorrichtungen

#### 3.1.1. Anschlußorte

In einer geschlossenen Heizungsanlage werden in der Regel **mehrere Sicherheitsventile** installiert. Die Notwendigkeit sei an Hand der im Bild 3.1 dargestellten Anlagenschaltung - heizwasserbeaufschlagter Wärmeübertrager mit statischer Druckhaltung - beispielsweise erläutert:

I. **Absperrbare Anlagenteile, in denen eine unplanmäßige Drucksteigerung auftreten kann, sind separat abzusichern.**

- So begrenzt das Sicherheitsventil (A) den Druck im abgesperrten Wärmeübertrager, der bei defekter Temperaturregelung eine Aufheizung erfährt oder dessen Heizfläche aufgerissen ist.

Lastfälle: Volumenexpansion beim Aufheizen (H3)

Dampfbildung (H9)

Rohrbruch (R)

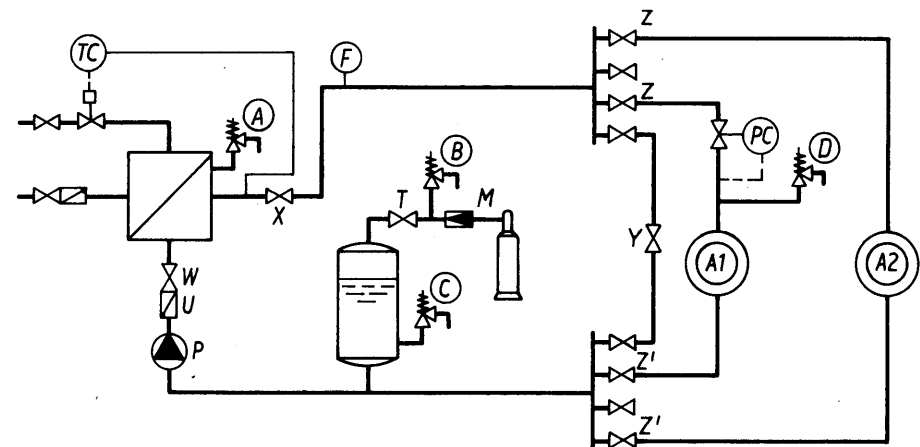


Bild 3.1 Heizungsanlage mit mehreren, durch Sicherheitsventile abgesicherten Anlagenteilen

- Weiterhin kann das Sicherheitsventil (A) ansprechen, wenn eine unkontrollierte Pumpenförderung bei abgesperrtem Ventil X mit Wasser aus dem Ausdehnungsgefäß auftritt. Diese Betriebsform ist möglicherweise auch noch mit einer zusätzlichen Erwärmung bzw. Verdampfung im Wärmeübertrager gepaart.

Lastfälle: Pumpenförderung (P)

Zufluß und Aufheizung (H12)

- Das Sicherheitsventil (B) verhindert den Druckaufbau im Leitungssystem zwischen dem Druckminderer M und dem abgesperrtem Ventil T bei fehlerhafter Nachdruckregelung bzw. bei auftretenden Leckagen der Reduziereinrichtung.

Lastfall: Druckmedienzufluß über eine Drosselstelle (M)

- Um Druckmedienverluste zu vermeiden, ist - wenn möglich - der Einsatz von Sicherheitsabsperrventilen zu bevorzugen.
- Selbstverständlich könnten auch die Abnehmerstromkreise an den Verteilern und Sammelern durch die Ventile Z und Z' abgesperrt sein. Eine Volumenexpansion des Wasserinhaltes wäre lediglich durch eine Wärmezufuhr aus der Umgebung denkbar. Eine Temperatursteigerung von 10 °C auf 20 °C bewirkte aber nur eine 0,15 prozentige Volumenvergrößerung, die durch die üblichen Leckverluste während der relativ langen "Aufheizzeit" kompensiert würde. Die Anordnung von Sicherheitsventilen an den einzelnen Stromkreisen ist deshalb nicht vorgeschrieben und auch nicht üblich. Das beiderseitige Absperrren der Stromkreise sollte sich allerdings nur auf den Reparaturfall beschränken.

## II. Die in der Anlage entstehenden Abblaseströme sind auf möglichst kurzem Weg aus dem System abzuführen.

- Tritt Verdampfung des Wassers auf, so vergrößert sich das Volumen bei einem Sättigungsdruck von 0,3 MPa bzw. 1,0 MPa um etwa das 600- bzw. 200fache. Würde der Dampf nicht am Ort seines Entstehens abgeblasen, so müßte das aktivierte Sicherheitsventil bei stabiler Wasservorlage erst die 200- bis 600fache Wassermasse ableiten, bevor es den Dampf abführen könnte. Sehr große, technisch oftmals nicht realisierbare Ventilquerschnitte wären die Folge. Außerdem könnten örtliche Drucksteigerungen infolge der hohen Druckverluste in der zum Sicherheitsventil führenden Rohrleitung auftreten.
- Die Entscheidung über Anzahl und Anbringungsort der Sicherheitsventile sollte jedoch auch wirtschaftliche Aspekte beachten. So wäre der Wegfall des Sicherheitsventils (B) (gasdichte Ausführung) durchaus zu erwägen, wobei im Ansprechfall vom Sicherheitsventil (C) zunächst die volumenäquivalente Wassermasse abzuführen wäre (Gl. (2.55)). Sollte das Absperrventil T beibehalten werden, so müßten dieses und das Rohrsystem zwischen dem Druckminderer M und der Armatur T für den maximalen Vordruck vor der Reduziereinrichtung ausgelegt werden.

## III. Die technischen Regelwerke schreiben länderspezifisch die Einzelabsicherung spezieller Anlagenteile - beispielsweise von Druckbehältern - vor.

- Diese Forderung ist bei Behältern, die mit einem kompressiblen Medium gefüllt sind, besonders berechtigt, da im Schadensfall die gespeicherte Energie große Zerstörungen bewirken kann.
- Erfolgt die Absicherung der Heizungsanlage nach Bild 3.1, d.h., das Sicherheitsventil (B) ist installiert, so kann dem Sicherheitsventil (C) keine ursächlich am Behälter entstehende Belastung zugewiesen werden, wenn man die Aufheizung der stehenden Anlage durch die Umgebung vernachlässigt. Als Bemessungsgrundlage für (C) sei die bedeutend größere Volumenexpansion des im geschlossenen Kreislauf geförderten Wassers, das im Wärmeübertrager aufgeheizt wird, sich aber wegen abgesperrter Abnehmerstromkreise (Ventile Z geschlossen) bei offener Armatur Y nicht wesentlich abkühlt, verwendet. Nach dem Verursacherprinzip müßte dieser Abblasestrom dem Sicherheitsventil (A) zugewiesen werden. Da seine Entstehung aber an die Wasserumwälzung gebunden ist, kann man auch diese Zuordnung rechtfertigen.

Lastfall: Volumenexpansion beim Aufheizen des zirkulierenden Wasserstromes (H6)

## IV. Teilanlagen niedriger Druckstufen sind separat abzusichern.

- Der Abnehmerstromkreis A1 muß mit abgesenktem Vorlaufdruck betrieben werden. Das Sicherheitsventil (D) gewährleistet diesen auch bei ausgefallener Nachdruckregelung (PC).
- Lastfall: Wasserzuströmung über ein Stellventil (V)
- Um Wasserverluste zu vermeiden, die in der Gesamtanlage Betriebsstörungen bewirken können, sollten in diesen Fällen (z.B. in Hausanschlußstationen) bevorzugt Sicherheitsabsperrventile zum Einsatz kommen.
- Die separate Absicherung von Netzteilen nach Druckreduzierungen wird auch bei Druckluft-, Dampf- und Wasserverteilnetzen häufig angewendet, so beispielsweise, wenn Abnehmersysteme aus wirtschaftlichen Gründen in niedrigeren Druckstufen ausgeführt oder vorhandene Abnehmer mit niedrigen Konzessionsdrücken angeschlossen werden sollen.

### Anmerkung

Beziehen sich die Ansprechdrücke nicht auf ein einheitliches Niveau, so müssen mitunter gleiche Lastfälle zur Bemessung mehrerer Sicherheitsventile herangezogen werden. Dies sollte aber unbedingt vermieden werden. Ein praktisches Beispiel möge dies verdeutlichen.

Ein Hersteller von Baugruppen stellt das Sicherheitsventil (A) auf den Ansprechdruck  $p_A = 1,1 \text{ MPa}$  ein, da dies der höchstzulässige Betriebsdruck des Wärmeübertragers ist.

Die nachgeschaltete Anlage darf aber beispielsweise nur mit  $p = 0,6 \text{ MPa}$  betrieben werden. Die Baugruppen-Dokumentation schreibt für diesen Fall die Anbringung eines weiteren Ventils zur "Absicherung der Anlage" an der höchsten Stelle der Verteilungsleitung (F) vor. Dies müßte dann auch für die Lastfälle R und bei abgesperrtem Ventil W für H3 und H9 bemessen werden. Die Anordnung des zusätzlichen Sicherheitsventils (F) bringt somit keine größere Sicherheit, sondern bedeutet Materialvergeudung und erhöhten Wartungsaufwand. Dennoch kann es ein auf den Abnehmerdruck eingestelltes Sicherheitsventil (A) nicht ersetzen, denn bei geschlossenem Ventil X, aber offenem Ventil W würden die Lastfälle R, H3 und H9 trotzdem Drucksteigerungen in Teilen der Anlage hervorrufen können, da die Rückschlagklappe U im Sinne der Sicherheitstechnik kein typgeprüftes Bauteil ist und somit nicht als "sicheres" Schließorgan gilt.

### 3.1.2. Druckschaubilder

In den sogenannten Druckschaubildern werden die in den Rohrleitungen und Apparaten des Heizungssystems, des Wärmenetzes usw. auftretenden Drücke ortsabhängig aufgetragen. Dabei sind der **hydraulische Druckverlauf**, der den Drucksprung in der Pumpe sowie die strömungsbedingten Druckverluste berücksichtigt, und der **geodätische Höhenverlauf**, der die vertikale Lage der Anlagenteile über einem Bezugsniveau umgerechnet nach den Gesetzen der Hydrostatik auf Druckeinheiten wiedergibt, überlagert.

Eine ausführliche Beschreibung über zweckmäßige Darstellungsformen des Druckschaubildes und seine Herleitung findet sich in /6, S. 251 u.f./.

Die Druckverläufe sind vornehmlich von der Anlagengestalt und der konzipierten Druckhaltung sowie von der Betriebsweise abhängig. Wegen der großen Vielfalt der Einflüsse ist lediglich eine Grobklassifikation der Varianten möglich. Jede Anlage bedarf der eingehenden separaten Betrachtung.

Für zwei typische Heizungssysteme werden nachfolgend die Schaltschemata und die zugehörigen Druckschaubilder dargestellt.

#### Heizungsanlage mit statischer Saugdruckhaltung

Im Bild 3.2 ist eine einfache Schaltung mit Wärmebereitsteller, Umwälzpumpe, tief-liegendem, stickstoffbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß und einem Abnehmerbereich in Tallage vorgegeben. Die Absicherung erfolgt nach den technischen Vorschriften durch die Sicherheitsventile (A) und (B).

Im unteren Druckschaubild wird der geodätische Höhenverlauf  $p_H$  entwickelt. Er ergibt sich unter Bezug auf die Höhe  $H_0$ , die an der Einbindung der Leitung zum Ausdehnungsgefäß (Punkt 0) gilt, für jeden Anlagenpunkt  $i$  zu:

$$p_{H,i} = (H_i - H_0) \rho_w g. \quad (3.1)$$

Im Ergebnis erhält man den Polygonzug 0, 1, 2, ..., 13, 0. Die Lage der Sicherheitsventile ist eingetragen. Gemäß der technischen Konzeption soll der maximale Druck am

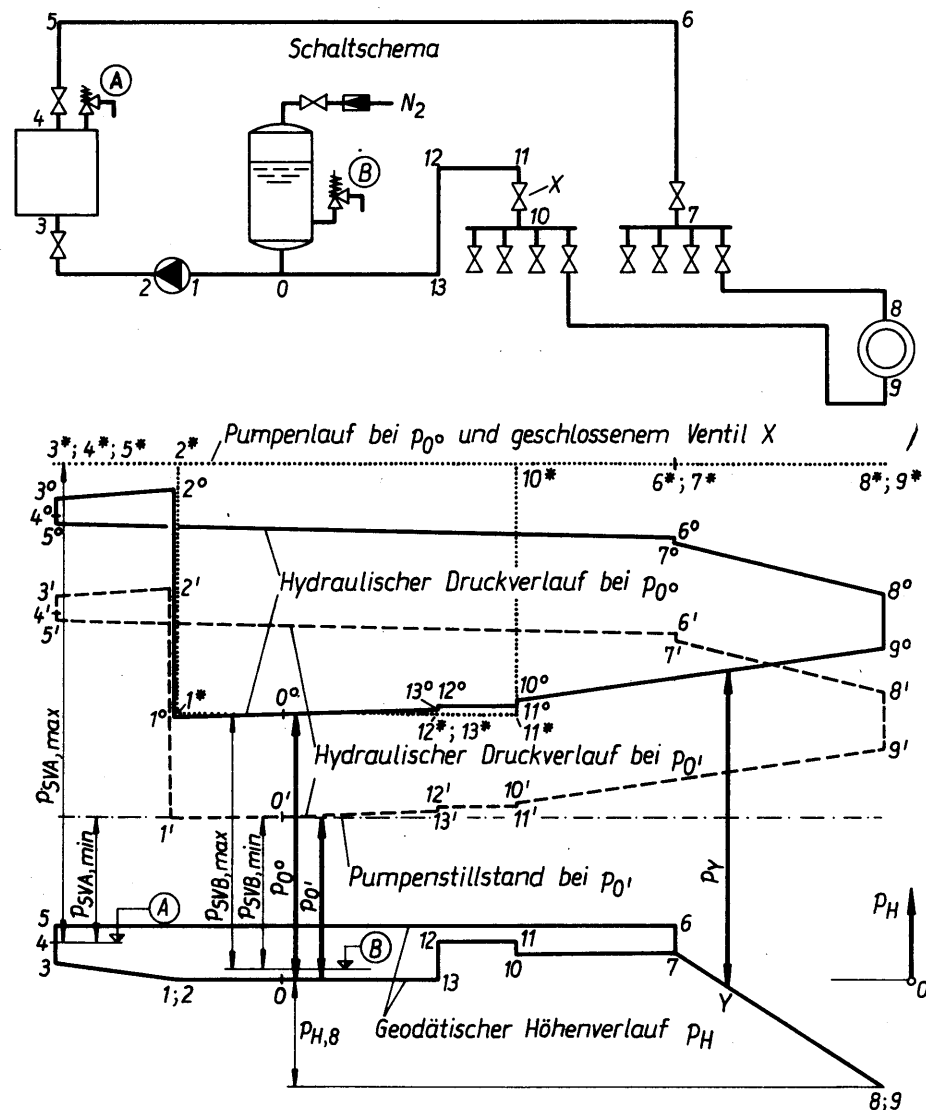


Bild 3.2 Schaltung und Druckschaubilder für eine Heizungsanlage mit statischer Saugdruckhaltung

Anbindepunkt des Ausdehnungsgefäßes  $p_0$  betragen. Von diesem Punkt aus wird der hydraulische Druckverlauf im Heizungssystem (Druckverluste und Pumpendifferenzdruck) im gleichen Druckeinheitenmaßstab wie beim geodätischen Höhenverlauf entwickelt. Im Bild entsteht so der durchgezogene Polygonzug  $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, \dots, 13^\circ, 0^\circ$ .

Der an beliebiger Stelle Y vorhandene Anlagendruck  $p_Y$  ergibt sich grafisch als Differenz zwischen hydraulischem Druckverlauf und geodätischem Höhenverlauf. Dieser Druck  $p_Y$  würde durch ein Manometer am Punkt Y angezeigt (Problematik Absolutdruck/Überdruck beachten!).

Im Ausdehnungsgefäß wird die temperaturbedingte Volumenschwankung des Wasserinhalts kompensiert. Dies ist an eine Druckänderung des Auflastmediums gekoppelt. Am Punkt 0 betrage der minimale Auflastdruck  $p_0$ . Der hydraulische Druckverlauf ist gegenüber der ersten Variante nunmehr niveaushoben. Es ergibt sich der gestrichelte Polygonzug  $0', 1' 2', \dots, 13', 0'$ .

Beide bisher vorgestellten hydraulischen Druckverläufe verkörpern Vollastbetriebsfälle, d.h., die Hauptumwälzpumpe fördert den Vollastmengenstrom durch ungedrosselte Wärmebereitsteller und Abnehmer. Es sind aber auch noch unzählige Teillast-Betriebsfälle und Ruhezustände (Pumpenstillstand) bei  $p_0$  und  $p_0$  liegenden Auflastdrücken denkbar. Die zugelassenen Extremverläufe müssen bei der Wahl der Sicherheitsventil-Ansprechdrücke  $p_{A,A}$  und  $p_{A,B}$  Beachtung finden.

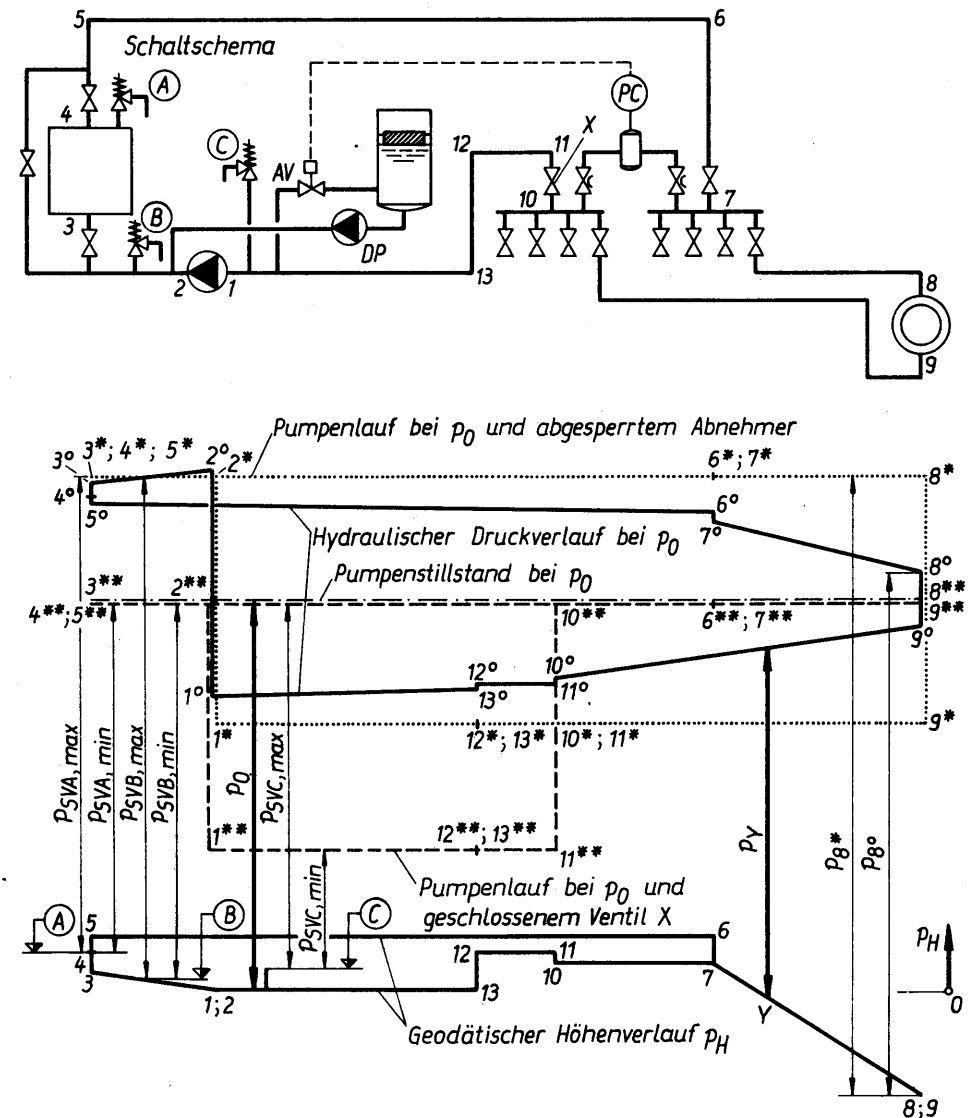
Zwei dieser möglichen Extremverläufe sind im Bild 3.2 eingetragen. Die strichpunktierte Drucklinie folgt bei Pumpenstillstand und gleichzeitig niedrigstem Auflastdruck  $p_0$ . Bei Pumpenlauf und Nullförderung infolge des geschlossenen Ventils X ergibt sich der punktierte Druckverlauf mit Eckpunkten  $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, \dots, 13^\circ, 0^\circ$ . Es ist zu beachten, daß nach der Pumpenkennlinie bei Nullförderung ein größerer Drucksprung als bei Vollastbetrieb zwischen Pumpendruck- und -saugstutzen auftritt. Die maximalen und minimalen Drücke an den Anschlußorten der Sicherheitsventile (A) und (B) sind als  $p_{SVA,max}$ ,  $p_{SVA,min}$ ,  $p_{SVB,max}$ ,  $p_{SVB,min}$  vermerkt.

Über die Wahl der tatsächlichen Ansprechdrücke wird später berichtet (Bild 3.6).

### Heizungsanlage mit dynamischer Mitteldruckhaltung

Das im Bild 3.3 gezeigte Schaltschema zeigt u.a. eine Variante der dynamischen Mitteldruckhaltung, die sogenannte GOEPFERT-Schaltung (vgl. auch /6, S. 230 u.f./). Der Mitteldruck wird aus den Drücken am Vorlaufverteiler und Rücklaufsammler gebildet. Das Abpseiseventil AV ist das Stellglied im Druckregelkreis PC. Die Druckdiktierpumpe DP fördert kontinuierlich in Abhängigkeit des Anlagendrucks am Punkt 2. Das Ausdehnungsgefäß ist nur durch einen Schwimmkörper mit Silikonöhring verschlossen, d.h., es ist druckmäßig an den Atmosphärendruck angeköpelt. Die Druckabsicherung sollen die Sicherheitsventile (A), (B) und (C) übernehmen. Der Bypass parallel zum Wärmeerzeuger ist normalerweise geschlossen.

Im unteren Teil des Bildes 3.3 ist analog zum Bild 3.2 der geodätische Höhenverlauf  $p_H$  auf der Grundlage der Gl. (3.1) dargestellt.



**Bild 3.3** Schaltung und Druckschaubilder für eine Heizungsanlage mit dynamischer Mitteldruckhaltung

Der gewünschte Mitteldruck  $p_0$  - bezogen auf  $p_H = 0$  - ist als strichpunktierte Linie eingetragen. Ausgerichtet auf diese Niveaulinie kann der hydraulische Druckverlauf im Heizungssystem (Druckverluste und Pumpendifferenzdruck) eingeordnet werden. Aufgrund der gewählten Druckmeßstellen zur Mitteldruckermittlung müssen die Punkte  $7^\circ$  und  $10^\circ$  symmetrisch zur Linie  $p_0$  liegen. Der zur Darstellung von  $p_H$  gewählte Maßstab für die Druckeinheit muß selbstverständlich beibehalten werden. Im Ergebnis entsteht der Polygonzug  $1^\circ, 2^\circ, \dots, 13^\circ, 1^\circ$ .

Der Anlagendruck an der Stelle Y wird wiederum durch  $p_Y$  dargestellt.

Bei Teillastbetrieb (kleinerer Förderdruck der Umwälzpumpe) rückt der Druckverlauf näher zur Niveaulinie  $p_0$ . Bei Pumpenstillstand stellt sich schließlich ein dem Mitteldruck  $p_0$  identischer Ruhedruck ein. Dies ist der wesentliche Vorzug der Mitteldruckhaltung, da bei großen hydraulischen Drucksprüngen und/oder großen geodätischen Höhenunterschieden die verbleibenden Bereiche zwischen den zulässigen Druckgrenzen voll genutzt werden können. Denn die Teillastzustände und der Ruhedruck liegen innerhalb des hydraulischen Vollastverlaufs und bedürfen keiner separaten Untersuchung. Eine Verschiebung des gesamten Druckdiagramms, wie dies bei der statischen Druckhaltung bedingt vorkommt, tritt ebenfalls nicht auf. Dennoch können Bedienfehler extrem abweichende Druckverläufe bewirken. Zwei Beispiele sind im Bild 3.3 eingetragen. Der punktierte Druckverlauf  $1^*, 2^*, \dots, 13^*, 1^*$  entsteht, wenn die Vollastpumpe bei völlig abgesperrtem Abnehmer betrieben wird. Eine vom Abnehmerdifferenzdruck ( $p_{8^*} - p_{9^*}$ ) oder vom Netzdifferenzdruck ( $p_{7^*} - p_{10^*}$ ) abhängige automatisierte Pumpenwahl oder Pumpendrehzahlregelung würde diesen Betriebsfall verhindern. Damit wären die Abnehmerdrücke nicht  $p_{8^*}$ , sondern wie im ersten Fall begrenzt auf  $p_{8^*}$ .

Der gestrichelte Druckverlauf  $1^{**}, 2^{**}, \dots, 13^{**}, 1^{**}$  ergibt sich wiederum bei Betrieb der Vollastpumpe mit der Förderhöhe für  $\dot{V} = 0$  und geschlossenem Ventil X. Der Druck in der Rücklaufleitung würde im Bereich zwischen dem Anlagenpunkt 10 und 1 beträchtlich unterschritten.

Die an den Anschlußorten der Sicherheitsventile (A) bis (C) maximal und minimal zu erwartenden Drücke sind im Bild 3.3 als  $p_{SVA, \max}$  bis  $p_{SVC, \min}$  eingetragen.

Die Festlegung der Ansprechdrücke erfolgt im Zusammenhang mit Bild 3.7.

### 3.1.3. Ansprechdrücke

Bei der Festlegung des **Ansprechdruckes**  $p_A$  ist der in Gl. (1.1) formulierten Grundbedingung

$$p_A \leq p_{Anl} \leq p_B \quad (3.2)$$

zu genügen. Es bedeuten

$p_A$  Ansprechdruck des Sicherheitsventils

$p_{Anl}$  maximaler Anlagendruck

$p_B$  Berechnungsdruck.

Der **Normaldruckbereich** ist durch die Grenzwerte  $p_{N, \max}$  und  $p_{N, \min}$  determiniert. Handelt es sich um eine geregelte Größe, so können noch **Toleranzen**  $\pm \Delta p_T$  - beispielsweise durch die Regelungstoleranzen der Druckhalteanlage  $\Delta p_{Re}$  - auftreten.

Um bei Normalbetrieb Dichtschluß des Sicherheitsventils zu garantieren, muß außerdem die sogenannte **Arbeitsdruckdifferenz**  $\Delta p_{Arb}$  (vgl. Abschnitt 4.) eingehalten werden. Damit ergeben sich die Forderungen für den

#### Ansprechdruck

$$p_A \geq p_{N, \max} + \Delta p_T + \Delta p_{Arb}, \quad (3.3)$$

#### Schließdruck

$$p_{Sch} \geq p_{N, \min} - \Delta p_T. \quad (3.4)$$

Schließt das Sicherheitsventil erst an der zulässigen Untergrenze des Druckbereiches, so kann damit ein sehr großer Medienverlust verbunden sein. Soll dieser im Abblasefall auf ein Minimum begrenzt werden, ist die Bedingung

$$p_{Sch} \geq p_{N, \max} + \Delta p_T \quad (3.5)$$

zu erfüllen.

Ist die Schließdruckdifferenz größer als die Arbeitsdruckdifferenz oder entspricht dieser ( $\Delta p_{Sch} \geq \Delta p_{Arb}$ ), so kann ausgehend von Gl. (3.5) die Arbeitsdruckdifferenz unbeachtet bleiben. Diese Tatsache wird oftmals voraussetzend angenommen.

#### Absicherung einer Heizungsanlage oder eines Wärmenetzes

Die sinnvolle Absicherung einer Anlage erfordert weitergehende Überlegungen, da mit der Druckbegrenzung am Anschlußort der Sicherheitsventile gleichzeitig auch Druckbegrenzungen an peripheren Anlagenteilen zu gewährleisten sind. Außerdem können in den Heizungsanlagen große, örtlich unterschiedliche Druckschwankungen auftreten, wie aus den Druckschaubildern (Bilder 3.2 und 3.3) beispielhaft hervorgeht.

Schließlich müssen noch **Toleranzen der Druck- und Temperaturregelung** sowie mögliche **instationäre Druckverläufe** Beachtung finden. In /6, S. 200 u.f./ werden ausführliche Hinweise gegeben. Zusammengefaßt gelten:

- Die **Regelungstoleranzen**  $\Delta p_{Re}$  und  $\Delta t_{Re}$  sind entsprechend den eingesetzten Geräten, der Trägheit des Systems und weiteren spezifischen Bedingungen festzulegen.
- **Dynamische Druckschwankungen** infolge von Schalthandlungen lassen sich weitestgehend durch eine geschickte Betriebsführung vermeiden. Als unvermeidbarer Störfall gilt jedoch der Ausfall der Umwälzpumpen. Die trotz konstruktiver Maßnahmen - wie z.B. die Anordnung eines geradlinigen Bypasses mit Rückschlagklappe zwischen Saug- und Druckleitung - verbleibende Druckschwankung sei  $\Delta p_{PA}$  genannt. Sie stellt die Anfangsamplitude einer abklingenden Schwingung um den sich unmittelbar nach Pumpenstillstand ergebenden Netzdruck dar. Arbeitet die Druckhaltung trägheitsbehaftet (Beispiel: dynamische Druckhaltung), so stellt sich zunächst der systemeigene Mit-

teldruck ein. Bei trägheitslos reagierender Druckhaltung (Beispiel: statische Druckhaltung mit großvolumigem, gas- oder dampfbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß und Netzanbindung mit geringem hydraulischem Widerstand) bildet sich sofort der Ruhedruck aus. Bei den praktisch ausgeführten Druckhalteanlagen – vor allem, wenn die Ausgleichsleitung zu den Ausdehnungsgefäßen nur nach den thermisch bedingten Volumenänderungen bemessen wurde – wird sich bei Ausfall der Umwälzpumpen nicht sofort der Ruhedruck einstellen. Es ist ein Wert zwischen systemeigenem Mitteldruck und Ruhedruck zu erwarten, der sich mit fortschreitender Zeit dem Ruhedruck nähert. Druckschwingungen, die diese Grundkurve überlagern, überschreiten dadurch den Ruhedruck nur gering oder überhaupt nicht.

- Weiterhin haben **Sicherheitszuschläge**  $\Delta p_{Si}$  und  $\Delta t_{Si}$  wegen der eventuell ungenauen Erfassung der Netz-Berechnungsdaten und wegen einer möglicherweise veränderten Nutzung der Trassen oftmals eine Berechtigung. In der Vergangenheit konnte man vielfach von der früher gewährten "Großzügigkeit" beim weiteren Netzausbau zehren.
- Gibt es keine Festlegungen oder versuchstechnische Ermittlungen bezüglich der Toleranzen und Sicherheitszuschläge, so sind diese nach den üblichen Regeln der Technik (Genauigkeitsklassifizierung, Fehlerfortpflanzung usw.) zu wählen.

Auch unter günstigsten Voraussetzungen sollten mindestens

$$\Delta p_{Si} + \Delta p_{Re} = 0,05 \text{ MPa} \quad \text{und} \quad \Delta t_{Si} + \Delta t_{Re} = 5 \text{ K}$$

angenommen werden.

Für Netze im Anwenderbereich mit Einsatz von einstufigen Kreiselpumpen und trägheitsbehaftet arbeitenden Druckhaltesystemen seien überschlägig in Abhängigkeit des Netzvolumens  $V_N$  nachfolgende Zuschläge empfohlen:

| $V_N$<br>$\text{m}^3$ | $\Delta p_{Re}$<br>MPa | $\Delta p_{Re} + \Delta p_{PA}$<br>MPa |
|-----------------------|------------------------|----------------------------------------|
| < 1000                | 0,03                   | 0,03                                   |
| 1000 ... 5000         | 0,03                   | 0,06                                   |

Diese Aussagen bedeuten nicht, daß der Zuschlag für instationäre Druckverläufe bei Pumpenausfall  $\Delta p_{PA} = 0$  bzw. 0,03 MPa beträgt, sondern daß keine einfache Addition der Störfälle vorgenommen wird:

Die genannten Fakten bedürfen einer **pragmatischen Wichtung**. Die Gl. (3.2) und (3.3), die den Ansprechdruck eingrenzen, sind unbedingt einzuhalten. Bezüglich des Schließdruckes ist die Gl. (3.4) verbindlich, das Beachten der Gl. (3.5) wäre jedoch wünschenswert. Da nach /17/ und /20/ bei Flüssigkeitsabströmung die zulässigen Schließdruckdifferenzen mit maximal 20 % des Ansprechüberdruckes festgelegt sind, während in den meisten Ländern Werte < 10 %, mitunter sogar < 4 % gefordert werden, ist die Be-

ziehung (3.5) in Heizungsanlagen oftmals nicht realisierbar. Als **Idealfall** sei vorerst

$$p_{Sch} \geq p_{N,max} \quad (3.6)$$

angestrebt und als äußerster **Grenzfall**

$$p_{Sch} \geq p_{N,min} \quad (3.7)$$

zugelassen. Spezielle Forderungen in den sicherheitstechnischen Vorschriften haben jedoch Priorität. Weiterhin ist es nicht notwendig, die gewählten Sicherheitszuschläge, Regelungstoleranzen und Schließdruckdifferenzen zu addieren; statt dessen sollte eine sinnvolle Überlagerung erfolgen.

Zur **Festlegung der Ansprechdrücke** der zu installierenden Sicherheitsventile wird ein **zweistufiger Prozeß** durchlaufen. Bei der weiteren Unterteilung stellt **Fall A** den anzustrebenden **Idealfall** dar, **Fall B** realisiert lediglich die **Mindestforderungen**.

### 1. Stufe:

#### Festlegung der Betriebs- und Normaldruckbereiche, ausgehend vom Berechnungs- und Sättigungsdruck

Im Bild 3.4 sind die nachfolgenden Zusammenhänge für drei Grundtypen von Druckhaltungen dargestellt. Es wird dabei nur auf den Fall A bezogen. Bei Fall B würden die zu bestimmenden Grenzdrücke lediglich durch die dicken Vollpfeile markiert.

Bei der Ableitung wird zunächst angenommen, daß der Ansprechdruck gleich dem Berechnungsdruck ( $p_A = p_B$ ) ist. Detailliert gelten:

#### **Maximal zulässiger Betriebsdruck**

Fall A

$$p_{max,zul} = p_B - \Delta p_{Si} \quad (3.8)$$

Fall B

$$p_{max,zul} = p_B \quad (3.9)$$

#### **Maximaler Vorlaufdruck** (Statische Saug- und Mitteldruckhaltung)

Fall A

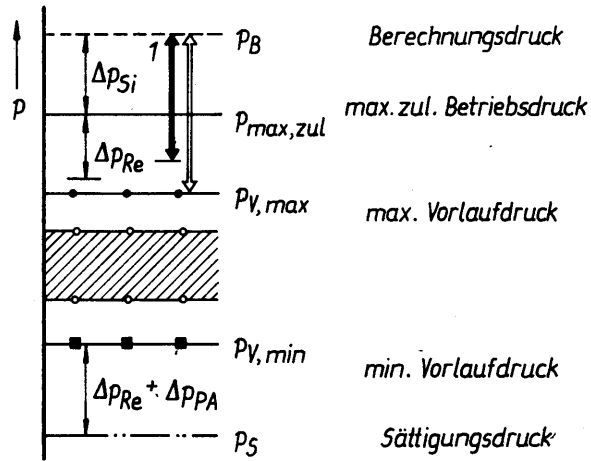
$$p_{V,max} = \min \{ (p_B - \Delta p_{Arb} - \Delta p_{Re}); (p_B - \Delta p_{Si} - \Delta p_{Re}); (p_B - \Delta p_{Sch}) \} \quad (3.10)$$

Fall B

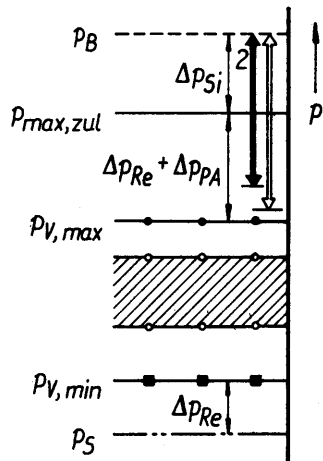
$$p_{V,max} = p_B - \Delta p_{Arb} - \Delta p_{Re} \quad (3.11)$$

**Maximaler Vorlaufdruck** (Statische Enddruckhaltung) bzw. **maximaler Mitteldruck** (Mitteldruckhaltung) mit  $p_{M,max}$  anstelle  $p_{V,max}$

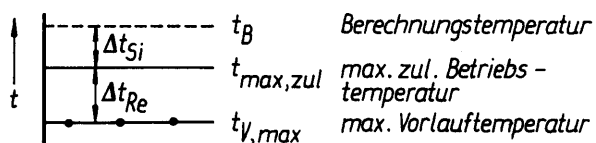
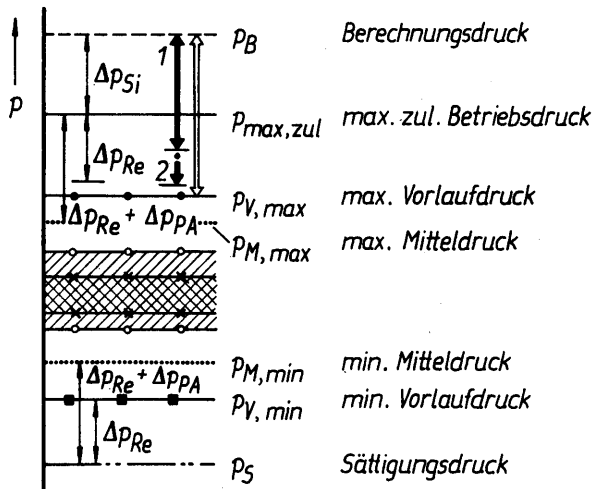
## Statische Saugdruckhaltung



## Statische Enddruckhaltung

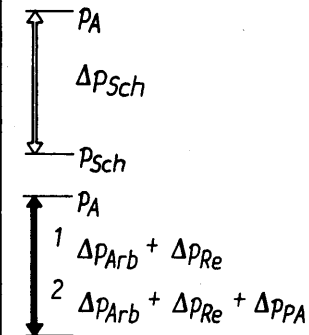


## Dynamische Mitteldruckhaltung

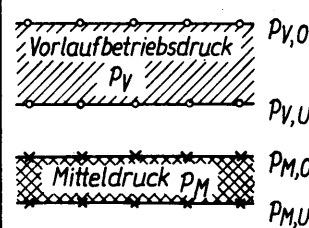


## Erklärungen:

Schließdruckdifferenz  $\Delta p_{Sch}$   
Arbeitsdruckdifferenz  $\Delta p_{Arb}$



## Normaldruckbereiche



Fall A

$$p_{V,max} = \text{Min} \left\{ (p_B - \Delta p_{Arb} - \Delta p_{Re} - \Delta p_{PA}); (p_B - \Delta p_{Si} - \Delta p_{Re} - \Delta p_{PA}); (p_B - \Delta p_{Sch}) \right\} \quad (3.12)$$

Fall B

$$p_{V,max} = p_B - \Delta p_{Arb} - \Delta p_{Re} - \Delta p_{PA} \quad (3.13)$$

## Maximal zulässige Betriebstemperatur

$$t_{max,zul} = t_B - \Delta t_{Si} \quad (3.14)$$

## Maximale Vorlauf-temperatur

$$t_{V,max} = t_{max,zul} - \Delta t_{Re} \quad (3.15)$$

Sättigungsdruck zu  $t_{max,zul}$ 

$$p_S = p_S(t_{max,zul}) = p_S(t_{V,max} + \Delta t_{Re}) \quad (3.16)$$

## Minimaler Vorlaufdruck (Statische End- und Mitteldruckhaltung)

Fall A

$$p_{V,min} = p_S + \Delta p_{Re} \quad (3.17)$$

Fall B (Beachten der Gl. (3.7))

$$p_B - \Delta p_{Sch} \approx p_{V,min} = p_S + \Delta p_{Re} \quad (3.18)$$

Minimaler Vorlaufdruck (Statische Saugdruckhaltung) bzw. minimaler Mitteldruck (Mitteldruckhaltung) mit  $p_{M,min}$  anstelle  $p_{V,min}$ 

Fall A

$$p_{V,min} = p_S + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} \quad (3.19)$$

Fall B (Beachten der Gl. (3.7))

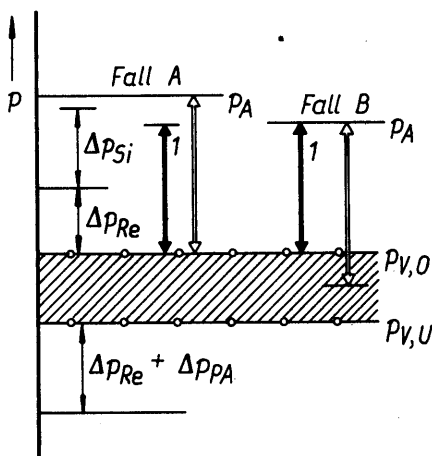
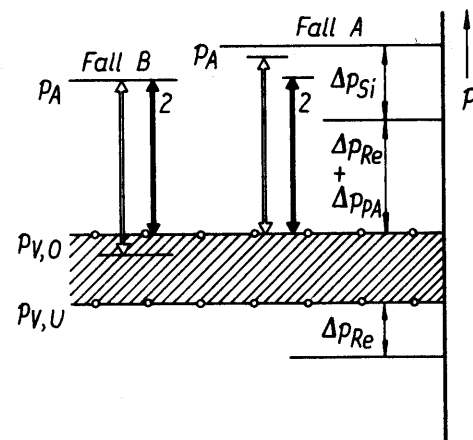
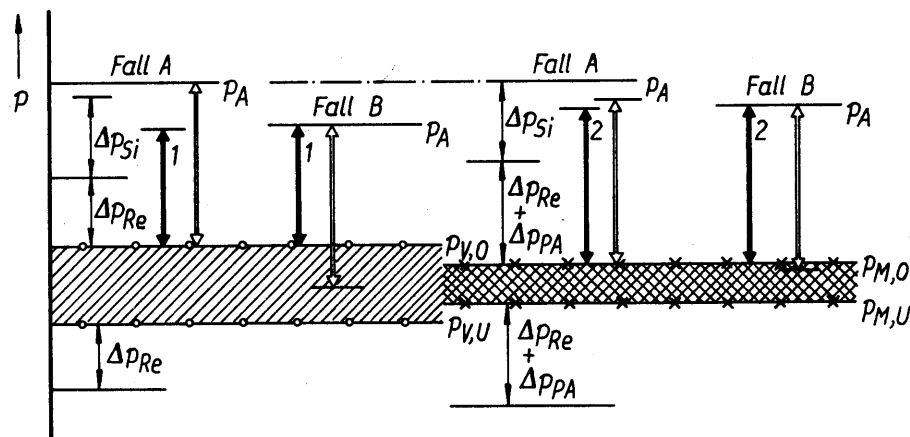
$$p_A - \Delta p_{Sch} \approx p_{V,min} = p_S + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} \quad (3.20)$$

Zwischen  $p_{V,max}$  und  $p_{V,min}$  sind die Druckschaubilder anlagenspezifisch einzuordnen und der Normaldruckbereich des Vorlaufbetriebsdruckes  $p_V$  festzulegen. Die Grenzwerte dürfen dabei tangiert werden. Analog ist der Normaldruckbereich des Mitteldruckes ( $\approx$  Ruhedruck)  $p_M$  zwischen  $p_{M,max}$  und  $p_{M,min}$  zu fixieren.

Für die Begrenzungen der Normaldruckbereiche gelten die Bezeichnungen:

- $p_{V,0}$  Oberwert des Vorlaufbetriebsdruckes  $p_V$
- $p_{V,U}$  Unterwert des Vorlaufbetriebsdruckes  $p_V$
- $p_{M,0}$  Oberwert des Mitteldruckes  $p_M$
- $p_{M,U}$  Unterwert des Mitteldruckes  $p_M$

Bild 3.4 Ableitung der zulässigen Betriebs- und Normaldruckbereiche, ausgehend vom Berechnungsdruck und vom Sättigungsdruck

**Statische Saugdruckhaltung****Statische Enddruckhaltung****Dynamische Mitteldruckhaltung**

**Bild 3.5** Ableitung der Ansprechdrücke, ausgehend von den Normaldruckbereichen und den Schließdruckdifferenzen (Erklärungen wie Bild 3.4)

**2. Stufe:****Festlegung der Ansprechdrücke, ausgehend von den Normaldruckbereichen**

Nach Festlegung der Normaldruckbereiche sind darauf aufbauend - unter Beachtung der möglichen Toleranzen und der Schließdruckdifferenz - die Ansprechdrücke endgültig zu fixieren. Es werden hierbei wiederum die Fälle A und B unterschieden:

**Absicherung des Vorlaufdruckes (Statische Saug- und Mitteldruckhaltung)**

Fall A

$$p_A = \text{Max} \left\{ (p_{V,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{Arb}); (p_{V,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{Si}); (p_{V,0} + \Delta p_{Sch}) \right\} \quad (3.21)$$

Fall B

$$p_A = p_{V,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{Arb}; \quad p_{Sch} \geq p_{V,U} \quad (3.22)$$

**Absicherung des Vorlaufdruckes (Statische Enddruckhaltung)**

Fall A

$$p_A = \text{Max} \left\{ (p_{V,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} + \Delta p_{Arb}); (p_{V,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} + \Delta p_{Si}); (p_{V,0} + \Delta p_{Sch}) \right\} \quad (3.23)$$

Fall B

$$p_A = p_{V,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} + \Delta p_{Arb}; \quad p_{Sch} \geq p_{V,U} \quad (3.24)$$

**Absicherung des Mitteldruckes (Mitteldruckhaltung)**

Fall A

$$p_A = \text{Max} \left\{ (p_{M,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} + \Delta p_{Arb}); (p_{M,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} + \Delta p_{Si}); (p_{M,0} + \Delta p_{Sch}) \right\} \quad (3.25)$$

Fall B

$$p_A = p_{M,0} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} + \Delta p_{Arb}; \quad p_{Sch} \geq p_{M,U} \quad (3.26)$$

Die Zusammenhänge sind im Bild 3.5 aufgezeichnet.

Die geodätischen Höhenunterschiede zwischen den betrachteten Netzteilen und den Installationspunkten der Sicherheitsventile sind zusätzlich bei der Festlegung der endgültigen Ansprechdrücke zu berücksichtigen.

**3.1.4. Qualität und Grenzen der Absicherung****Qualitative Grundsätze**

Der Freiraum zur Entwicklung des Druckschaubildes wächst, wenn für die Toleranzen  $\Delta p_{Re}$  sowie  $\Delta t_{Re}$ , für die instationäre Druckschwingung  $\Delta p_{PA}$  und für den Sicherheitszuschlag  $\Delta t_{Si}$  möglichst kleine Werte in Ansatz gebracht werden können. Dies erfordert präzise arbeitende Regelungen, Druckstöße vermeidende Schaltungen und genaue Berechnungen.

Werden diese Forderungen erfüllt, dann sollten auch Sicherheitsventile mit möglichst kleinen Arbeits- und Schließdruckdifferenzen ( $\Delta p_{Arb}$ ,  $\Delta p_{Sch}$ ) zum Einsatz gelangen. Dieser Zusammenhang ist aus Bild 3.5 direkt ablesbar.

Wird den genannten Grundprinzipien entsprochen, dann kann eine exakte punktuelle und differenzierte Absicherung erfolgen. Bei relativ großen Toleranzbereichen und Schließdruckdifferenzen lohnt sich dagegen oftmals eine differenzierte Absicherung nicht. Dies trifft beispielsweise auch für die im Bild 3.5 gezeigte dynamische Mitteldruckhaltung zu. Würde man auch für den Vorlaufbetriebsdruck den gleichen Ansprechdruck  $p_A$  wählen, wie er zur Absicherung des Mitteldruckes ( $\equiv$  Ruhedruck) benötigt wird (strichpunktierter Linienzug), so könnte ein Sicherheitsventil entfallen.

### Grenzen der Absicherung

Ausgehend von der punktuellen Druckbegrenzung durch ein Sicherheitsventil im Ansprechfall sind die Drücke nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten in der Gesamtanlage bestimmbar. Dies sei an Hand der im Abschnitt 3.1.2. besprochenen Druckschaubilder erneut verfolgt.

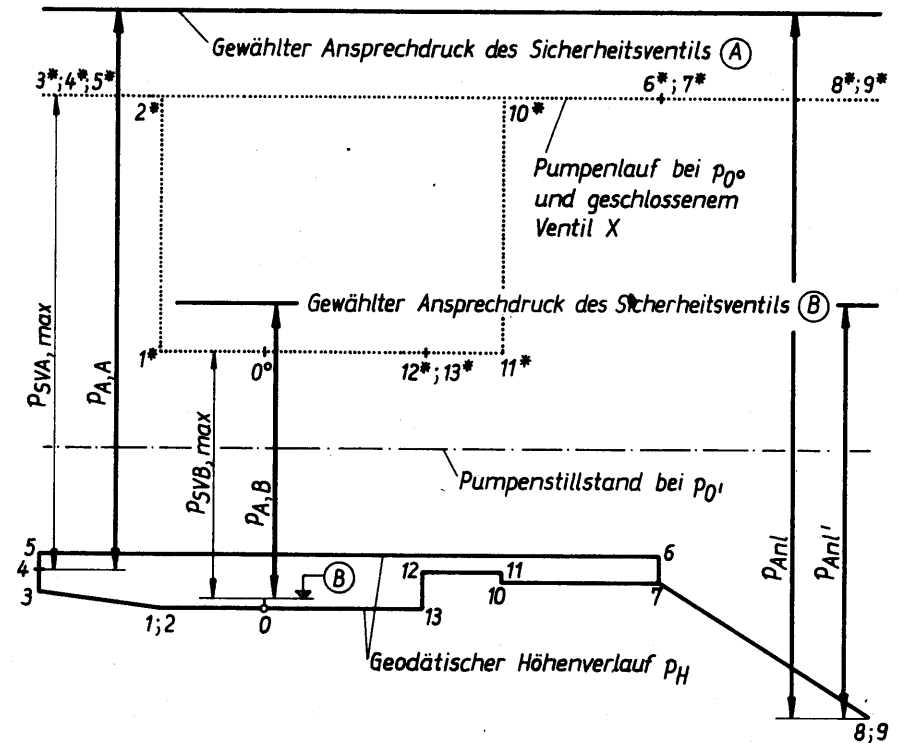
Im Bild 3.6 sind die höchsten und niedrigsten Druckverläufe, die im Bild 3.2 ermittelt wurden, eingetragen. Die an den Anschlußorten der Sicherheitsventile (A) und (B) möglichen Maximaldrücke  $p_{SVA,max}$  und  $p_{SVB,max}$  sind ebenfalls in das Bild 3.6 übernommen. Darauf aufbauend seien unter Beachten der im Abschnitt 3.1.3. gegebenen Hinweise die Ansprechdrücke  $p_{A,A}$  und  $p_{A,B}$  fixiert.

Da sich die Abnehmer in Tallage befinden, werden dort die höchsten Anlagendrücke auftreten. Zwei Fälle sind relevant:

1. Bei Pumpenstillstand und allerorts geöffneten Ventilen würde sich bei einer defekten Druckmedienregelung, die zum Ansprechen des Sicherheitsventils (B) führt, der maximale Druck  $p_{Anl'}$  ergeben.
2. Bei Pumpenlauf und geschlossenem Ventil X würde bei Ansprechen des Sicherheitsventils (A) der Abnehmer mit dem Druck  $p_{Anl}$  belastet. Dieser Druck könnte auch durch andere Lastfälle verursacht werden, beispielsweise wenn infolge Dampfbildung im Wärmeübertrager das Sicherheitsventil (A) aktiviert würde. Bei Pumpenstillstand und allerorts geöffneten Ventilen bliese zwar vorher das Sicherheitsventil (B) ab, könnte aber gemäß getroffener Lastzuordnung einen weiteren Druckanstieg bis zum Ansprechen von (A) nicht verhindern.

Im Bild 3.7 sind die Ansprechdrücke der Sicherheitsventile (A), (B) und (C) eingetragen. Sie werden aus den Angaben des Bildes 3.3 und des Abschnittes 3.1.3. abgeleitet. Zur Orientierung ist der hydraulische Druckverlauf, der sich im Vollastbetriebszustand einstellt, vermerkt. Die Anschlußorte waren nach folgenden Überlegungen gewählt worden:

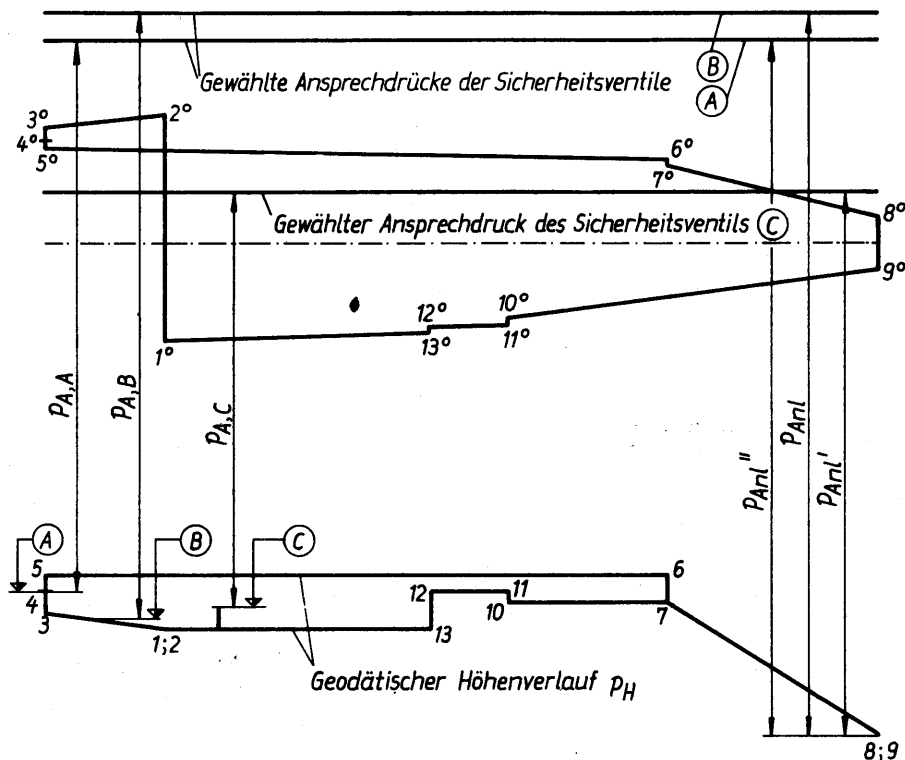
Das Sicherheitsventil (A) sichert den Wärmeerzeuger ab. Das Sicherheitsventil (B) begrenzt den Netzdruck für den Fall, daß der Wärmeerzeuger abgesperrt ist und evtl. durch einen Bypass umgangen wird. Schließlich garantiert das Sicherheitsventil (C) den Ruhedruck bei Stillstand der Umwälzpumpe.



**Bild 3.6** Ableitung der maximalen Anlagendrücke bei Ansprechen der installierten Sicherheitsventile für die im Bild 3.2 vorgestellte Schaltung mit statischer Saugdruckhaltung

Bei der Festlegung der Ansprechdrücke  $p_{A,A}$  und  $p_{A,B}$  ist noch ein Versatz beachtet worden, der das Ansprechen in der Reihenfolge erst (A), dann (B) gewährleistet. Die üblicherweise ausgewiesenen Vorzüge der Mitteldruckhaltung, daß die Druckverläufe der Teillastzustände und der Ruhedruck innerhalb des hydraulischen Vollast-Druckverlaufs liegen, trifft – wie zu Bild 3.3 bereits beschrieben – nicht für durch Bedienungsfehler verursachte Betriebszustände zu. Extreme Abweichungen vom Vollastverlauf sind vor allem bei Störfällen zu erwarten.

So würden gemäß Bild 3.7 beim Ansprechen der Sicherheitsventile (A) oder (B) Anlagendrücke von  $p_{Anl''}$  oder  $p_{Anl}$  auftreten; d.h., die Auswirkungen von Störfällen im Bereich der Wärmebereitstellungs-, Umwälz- und Druckhalteanlage werden trotz aktivierter Sicherheitsventile in diesem Bereich auf das Netz bis zu peripheren Abnehmern übertragen.

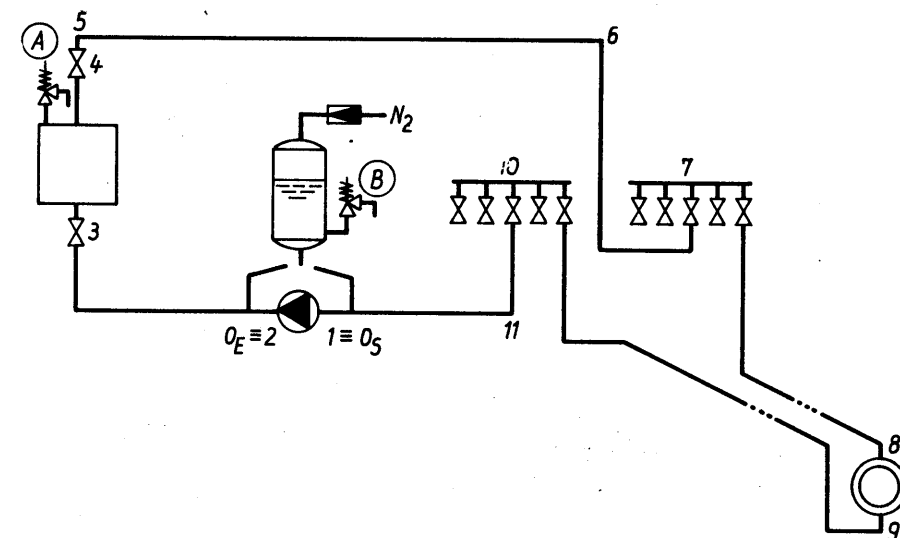


**Bild 3.7** Ableitung der maximalen Anlagendrücke bei Ansprechen der installierten Sicherheitsventile für die im Bild 3.3 vorgestellte Schaltung mit dynamischer Mitteldruckhaltung

Damit sind die Grenzen der Drucksicherung mittels Sicherheitsventilen deutlich geworden. Abhilfe kann nur durch Einsatz von typgeprüften Verriegelungen, Sicherheitsabsperrenten, die ausgewählte Netzteile notfalls von der Anlage trennen, u.a.m. geschaffen werden.

### 3.1.5. Beispiel

Ein Heizwassernetz wird von einer Wärmeübertragerstation aus gespeist und versorgt direkt angeschlossene Abnehmer. Das Schaltschema entspricht dem Bild 3.8. Die Höhenkoordinaten  $H_i$  der markierten Punkte und die hydraulischen Druckverluste  $\Delta p_{i,j}$  zwischen diesen Punkten finden sich in der nachfolgenden Tabelle:



**Bild 3.8** Prinzipschaltung der im Beispiel 3.1.5. betrachteten Fernheizungsanlage mit Darstellung zweier statischer Druckhaltungssysteme  
Anschlußpunkte des Ausdehnungsgefäßes:  
 $O_S$  Saugdruckhaltung;  $O_E$  Enddruckhaltung

| i              | $H_i$<br>m | $\Delta p_{i,j}$<br>kPa |
|----------------|------------|-------------------------|
| 1 $\equiv O_S$ | 0          | - 298                   |
| 2 $\equiv O_E$ | 0          | 5                       |
| 3              | 2          | 20                      |
| 4              | 4          | 1                       |
| 5              | 5          | 1                       |
| 6              | 5          | 10                      |

| i   | $H_i$<br>m | $\Delta p_{i,j}$<br>kPa |
|-----|------------|-------------------------|
| 7   | 3          | 100                     |
| 8   | - 20       | 50                      |
| 9   | - 20       | 100                     |
| 10  | 3          | 1                       |
| 11  | 0          | 10                      |
| (A) | 4          |                         |
| (B) | 2          |                         |

Der negative Druckverlust  $\Delta p_{1,2}$  stellt in Wirklichkeit den Drucksprung in der Pumpe bei Vollast-Förderstrom dar. Bei Nullförderung ergibt sich  $\Delta p_{1,2} = - 400$  kPa. Die Anlage soll im Abnehmerbereich in der Druckstufe PN 10 ( $p_B = 1,1$  MPa) ausgeführt werden. Weiterhin sollen gelten:  $\Delta p_{Re} = 30$  kPa;  $\Delta t_{Re} = 5$  K;  $\Delta p_{Re} + \Delta p_{PA} = 30$  kPa;  $\Delta p_{Si} = 50$  kPa.

Die Betriebstemperaturen im Vollastfall betragen maximal  $t_{V,max} = 130\text{ °C}$ . Für die Druckänderung im Ausdehnungsgefäß wird ein möglichst kleines Druckverhältnis  $\pi =$

$p_{A,min}/p_{A,max}$  angestrebt.

Es ist ein technisch begründeter Vorschlag für die Ansprechdrücke der Sicherheitsventile zu unterbreiten, wenn deren Schließdruck etwa 15 % unter dem Ansprechdruck liegt und eine Arbeitsdruckdifferenz von 7 % gilt.

Die geeignetste Druckhalteart (Saug- oder Enddruckhaltung) ist auszuwählen.

### Lösung

Die zu treffenden Entscheidungen und Ergebnisse werden schrittweise erarbeitet.

### Geodätischer Höhenverlauf und Berechnungsdruck

Ausgehend von Gl. (3.1) werden für eine Dichte von  $\rho_w \approx 1000\text{ kg/m}^3$  die Punkte des geodätischen Höhenverlaufs berechnet. Es ergeben sich beispielsweise:  $p_{H,0} = 0\text{ kPa}$ ;  $p_{H,5} = 49\text{ kPa}$ ;  $p_{H,8} = -196\text{ kPa}$ . Der gesamte geodätische Höhenverlauf  $p_H$  ist im Bild 3.9 aufgezeichnet. Die horizontalen Abstände zwischen den Punkten sind willkürlich wählbar.

Der Berechnungsdruck  $p_B = 1100\text{ kPa}$  verläuft zum Linienzug 0,1, ..., 11,0 äquidistant.

### Vorlaufdruck und Rücklaufdruck

Bei der Berechnung der maximalen und minimalen Vorlaufdrücke ist die Druckhalteart zu berücksichtigen. Da gemäß Aufgabenstellung im vorliegenden Beispiel aber  $\Delta p_{Re}$  und  $\Delta p_{Re} + \Delta p_{PA}$  gleich groß anzunehmen sind, unterscheiden sich beide Berechnungsvarianten zahlenmäßig nicht.

Zur Ermittlung des maximalen Vorlaufdruckes ist Gl. (3.10) bzw. (3.12) auszuwerten. Es werden dazu die Schließ- und Arbeitsdruckdifferenz benötigt. Unter Annahme von  $p_A = p_B$  folgen:

$$\Delta p_{Sch} = 0,15 \cdot 1100\text{ kPa} = 165\text{ Pa}$$

$$\Delta p_{Arb} = 0,07 \cdot 1100\text{ kPa} = 77\text{ Pa}$$

Gl. (3.10) liefert:

$$p_{V,max} = \min \{ (1100 - 77 - 30)\text{ kPa}; (1100 - 50 - 30)\text{ kPa}; (1100 - 165)\text{ kPa} \} = 935\text{ kPa}$$

Der minimale Vorlaufdruck ist nach Gl. (3.17) bzw. (3.19) zu bestimmen. Der Sättigungsdruck muß für  $t_{V,max} + \Delta t_{Re} = 135\text{ °C}$  gebildet werden, womit  $p_S = 313\text{ kPa}$  gilt. Gl. (3.17) ergibt:

$$p_{V,min} = (313 + 30)\text{ kPa} = 343\text{ kPa}$$

Als erforderlicher Rücklaufdruck ergibt sich für eine angenommene maximale Rücklauf-temperatur von  $100\text{ °C}$

$$p_{R,min} = p_S(100\text{ °C}) + \Delta p_{Re} = (100 + 30)\text{ kPa} = 130\text{ kPa}$$

Die Grenzkurven  $p_{V,max}$  sowie  $p_{V,min}$  sind für den Netzvorlauf und  $p_{R,min}$  für den Netzurücklauf im Bild 3.9 eingetragen.

### Ansprechdruck für Sicherheitsventil (A)

Da der hydraulische Grenzdruckverlauf am Punkt 8\*  $p_{V,max}$  tangiert, folgt nach Gl. (3.21) bzw. (3.23)  $p_A = p_B = 1100\text{ kPa}$ . Der tatsächliche Ansprechdruck ergibt sich unter Beachtung der Höhenlage zu

$$p_{A,A} = p_B - \rho_w g (H_A - H_B) = 1100\text{ kPa} - 1000 \cdot 9,81 \cdot (4 + 20)\text{ Pa}$$

$$p_{A,A} = 865\text{ kPa}$$

Dieser Wert und die Schließdruckdifferenz  $\Delta p_{Sch}$  sind im Bild vermerkt. Sie wurde aus Sicherheitsgründen bei dem maximalen Wert belassen.

### Hydraulische Druckverläufe bei einer Saugdruckhaltung

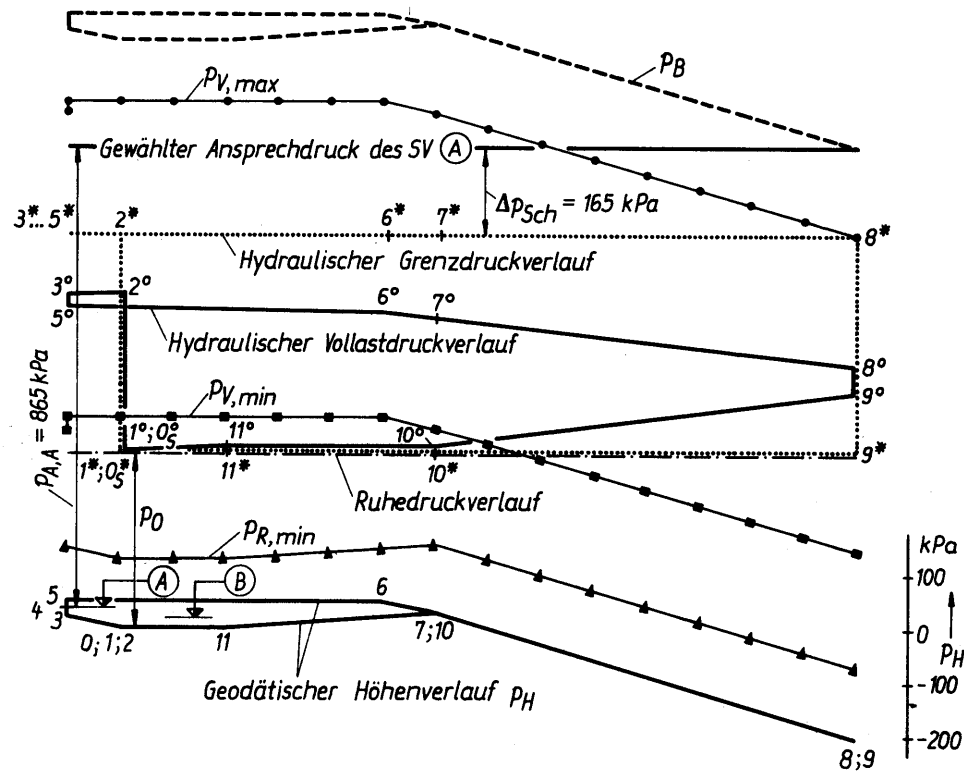
Das flächengrößte hydraulische Druckdiagramm (hydraulischer Grenzdruckverlauf) entsteht bei Betrieb der Umwälzpumpe mit der größten Förderhöhe bei gleichzeitig abgesperrtem Abnehmer. Er ist im Bild 3.9 durch den punktierten Polygonzug  $0_S^*, 1^*, \dots, 11^*, 0_S^*$  dargestellt. Der maximale Druck liegt um  $\Delta p_{Sch}$  unter dem gewählten Ansprechdruck und berührt am Abnehmerpunkt 8 den maximalen Vorlaufdruck. Damit ist die Einpassung nach "oben" ohne jeden weiteren Spielraum erfolgt und der maximale Druck  $p_0$  am Anbindepunkt des Ausdehnungsgefäßes fixiert. Der Vollast-Druckverlauf ohne Drosselung kann nun mit den in der Aufgabenstellung gegebenen Druckverlusten  $\Delta p_{i,j}$  entwickelt werden. Es entsteht der Linienzug  $0_S^*, 1^*, \dots, 11^*, 0_S^*$ . Der Vorlaufabschnitt verläuft zwischen  $p_{V,max}$  sowie  $p_{V,min}$  und der Rücklaufabschnitt liegt über  $p_{R,min}$ . Das heißt, der betrachtete Betriebsfall ordnet sich ohne Beanstandungen ein. Wird die Pumpe aber abgeschaltet, so ergibt sich bei aufgeheiztem Netz ein Ruhedruck, der teilweise unter  $p_{V,min}$  liegt. Im Vorlaufabschnitt könnte es somit zu Ausdampfungen kommen.

Außerdem ist eine generelle Verschiebung des Druckdiagramms nicht möglich. Diese muß aber gewährleistet sein, da die Volumenänderung nur durch eine Druckänderung im Ausdehnungsgefäß kompensiert werden kann.

Fazit: Eine Saugdruckhaltung ist nicht realisierbar.

### Hydraulische Druckverläufe bei einer Enddruckhaltung

Die bisherige Ableitung der Druckbegrenzungen  $p_{V,max}$ ,  $p_{V,min}$ ,  $p_{R,min}$ , der gewählte Ansprechdruck des Sicherheitsventils (A) und der punktiert eingetragene hydraulische Grenzdruckverlauf  $1^*, \dots, 0_E^*, \dots, 11^*, 1^*$  gelten unverändert. Der Anbindepunkt der Druckauflastung ist lediglich zu  $0_E^*$  verlagert. Die nunmehr geltenden Druckverhältnisse sind im Bild 3.10 dargestellt. Der Vollastdruckverlauf bei völlig aufgeheiztem Netz  $1^*, \dots, 0_E^*, \dots, 11^*, 1^*$  ordnet sich beanstandungslos zwischen die vorgegebenen



**Bild 3.9** Druckschaubild für die im Beispiel 3.1.5. betrachtete Fernheizungsanlage bei Einsatz einer statischen Saugdruckhaltung

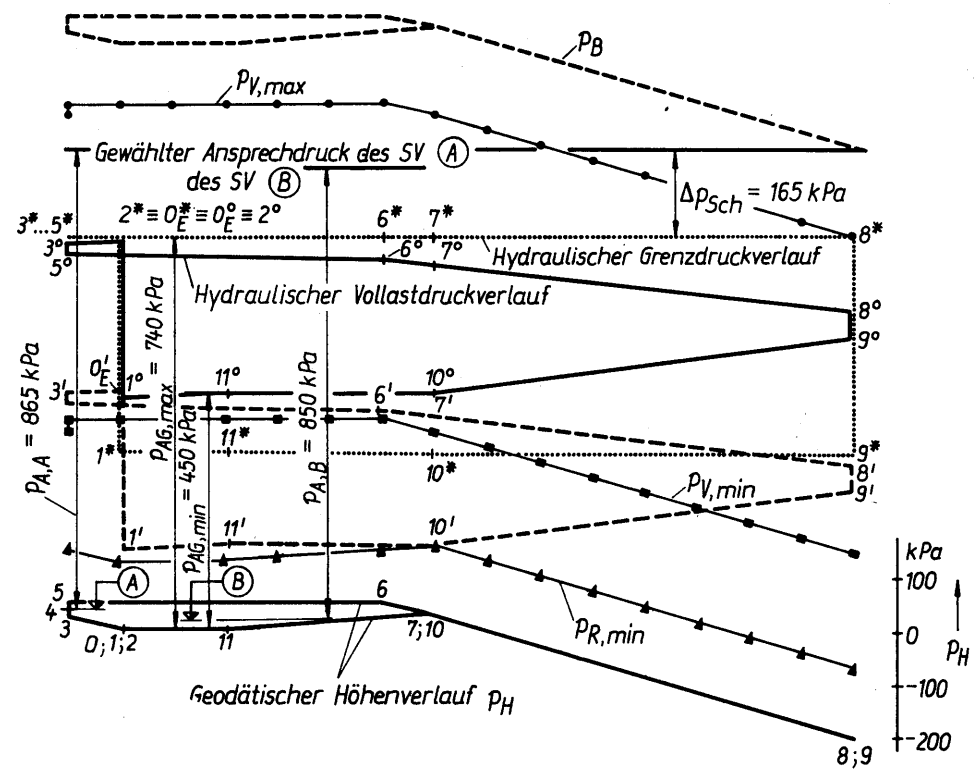
Druckbegrenzungen ein. Der Ruhedruck bei Netzstillstand würde der Linie 3\*, ..., 0<sub>E</sub>\*, ..., 8\* entsprechen.

Der Auflastdruck des abgekühlten Netzes darf bis auf 0<sub>E</sub>' sinken, ohne daß der Kurvenzug 1', ..., 0<sub>E</sub>', ..., 11', 1' im Vorlaufbereich p<sub>V,min</sub> und im Rücklaufbereich p<sub>R,min</sub> unterschreitet. Hierbei wird der hydraulische Grenzdruckverlauf ausgeschlossen.

Damit bewegen sich die Drücke im Ausdehnungsgefäß nach Ablesung aus Bild 3.10 zwischen p<sub>AG,max</sub> ≈ 740 kPa und p<sub>AG,min</sub> ≈ 450 kPa. Daraus folgt das sehr günstige Druckverhältnis

$$\pi = \frac{450}{740} = 0,61.$$

Der Betrieb der Anlage beim Einsatz einer Enddruckhaltung ist somit ohne weiteres möglich.



**Bild 3.10** Druckschaubild für die im Beispiel 3.1.5. betrachtete Fernheizungsanlage bei Einsatz einer statischen Enddruckhaltung

#### Ansprechdruck für Sicherheitsventil (B)

Theoretisch könnte das Ansprechniveau des Sicherheitsventils (B) auf die für (A) gewählte Bezugslinie (Bild 3.10) gelegt werden. Beide Ventile würden dann aber möglicherweise gleichzeitig ansprechen. Um das Ventil am Ausdehnungsgefäß aber zuerst zu aktivieren, wird der Ansprechdruck

$$p_{A,B} = 850 \text{ kPa}$$

vorgeschlagen. Erfolgt das Schließen mit der gleichen Schließdruckdifferenz wie sie beim Sicherheitsventil (A) angesetzt wurde, dann wird allerdings p<sub>AG,max</sub> unterschritten. Die Grundbedingung  $(p_{A,B} - p_{AG,max}) \geq (\Delta p_{Arb} + \Delta p_{Re} + \Delta p_{PA})$  ist jedoch erfüllt.

### 3.2. Anlagenspezifische, kombinierte Lastannahmen

In den Abschnitten 2.2. bis 2.6. wurden die Durchsätze durch ein unkontrolliert arbeitendes oder havariertes Bauteil – beispielsweise ein defektes, maximal geöffnetes Stellventil – untersucht, welches zwischen zwei definierten Druckräumen eingebaut ist.

Ausgehend vom Abblasedruck eines in Fließrichtung nach dem Stellventil installierten Sicherheitsventils läßt sich in Abhängigkeit der Anbringungshöhen beider Armaturen der Nachdruck hinter dem Stellventil relativ sicher bestimmen. Der Vordruck ist als konstant anzunehmen, wenn ein Hochbehälter, ein mit kompressiblem Medium beaufschlagter Druckbehälter oder ein großvolumiges Netz vorgeschaltet ist.

Diese vereinfachten Annahmen können jedoch nicht aufrechterhalten werden, wenn vor- oder nachdruckseitig der Stellventile Pumpen installiert sind. Vielmehr ist dann das Zusammenwirken der gesamten Teilanlage zu untersuchen.

#### 3.2.1. Zuströmung von Wasser über eine Pumpe-Stellventil-Kombination

Fällt die im Bild 3.11 dargestellte Druckregelung (PC) aus, so wird bei abgesperrter Teilanlage (Ventil X geschlossen) und entsprechenden Drücken das Sicherheitsventil SV1 beim Ansprechdruck  $p_{A,1}$  aktiviert.

Die gezeigte Schaltung kommt häufig bei dynamischen Druckhaltungen zum Einsatz. Es wird vorausgesetzt, daß nach dem Ventil V kein Ausdampfen auftreten kann.

Index des Lastfalles: PV

Charakteristische Eingangsgrößen:

$p_{PV}$  Druck im Behälter  
 $H_{PV}$  Höhe des Wasserspiegels im Behälter  
 $t_{PV}$  Wassertemperatur.

#### Algorithmus

Es sind die in den Abschnitten 2.2.1. und 2.3.1. vorgestellten Algorithmen zu verknüpfen.

Mit der zu  $t_{PV}$  gehörigen Wasserdichte  $\rho_W$  gilt, bezugnehmend auf die im Bild 3.11 gegebenen Größen unter Vernachlässigung der Rohrreibung, die Druckbilanz:

$$p_{PV} + H_{PV} \rho_W g + \Delta p_F(\dot{V}) = \Delta p_V(\dot{V}) + H_1 \rho_W g + p_{A,1} \quad (3.27)$$

Dabei ist der Pumpendruck  $\Delta p_F(\dot{V})$  aus der bekannten Pumpenförderhöhe (Pumpenkennlinie)  $H_F^*(\dot{V})$

$$\Delta p_F(\dot{V}) = \rho_W g H_F^*(\dot{V}) \quad (3.28)$$

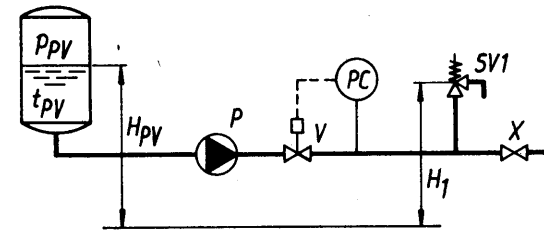


Bild 3.11 Zuströmung von Wasser im Havariefall durch unkontrollierte Pumpenförderung und defekte Drosselregelung

bestimmbar. Weiterhin gilt für die Druckdifferenz, die über dem Ventil abfällt, aus Gl. (2.25) folgend

$$\Delta p_V = \left( \frac{\dot{V}}{k_V} \right)^2 \rho_W \quad (3.29)$$

Der gesuchte Volumenstrom  $\dot{V}$ , der sich bei Druckgleichgewicht einstellt, kann grafisch ermittelt werden.

Da die Pumpenkennlinie  $H_F^*(\dot{V})$  als Förderhöhe in Funktion des Förderstromes  $\dot{V}$  gegeben ist, erscheint es zweckmäßig, die übrigen Summanden der Gl. (3.27) auf diese Druckhöhendarstellung umzurechnen. Es gilt dann

$$H_F^*(\dot{V}) = H_1 - H_{PV} + \frac{1}{g} \left( \frac{\dot{V}}{k_V} \right)^2 + \frac{p_{A,1} - p_{PV}}{g \rho_W} \quad (3.30)$$

Die korrigierte Durchströmfläche  $k_V$  ist bei der praktischen Auswertung durch den Ventilkoeffizienten gemäß Herstellerangabe  $k_V^*$  zu ersetzen. Es gilt mit  $k_V^*$  in  $\text{m}^3/\text{h}$

$$k_V = 28 \cdot 10^{-6} k_V^* \quad \text{in m}^2. \quad (3.31)$$

Beide Gleichungsseiten sind getrennt aufzuzeichnen. Existiert ein Schnittpunkt S, dann stellt das zugehörige  $\dot{V}_S$  den Abblasestrom dar.

In Tabelle 3.1 sind die genauen Bezeichnungen der charakteristischen Größen des Lastfalles gegeben.

Tabelle 3.1 Lastannahme bei Wasserzufluß über eine Pumpen-Stellventil-Kombination (PV)

| Schaltung / Variante | Abblasestrom     | Dichte                         |
|----------------------|------------------|--------------------------------|
|                      | $\dot{m}_{W1PV}$ | $\rho_{W1PV} = \rho_W(t_{PV})$ |

Unterprogramm

Die weiterhin gültige Bilanzgleichung (3.30) ist rechnerisch nur mittels Iterationen lösbar.

Voraussetzend muß die Pumpenkennlinie in Gleichungsform gemäß Gl. (2.24) approximiert werden.

Auf die Kennliniendarstellung mit der Förderhöhe in m und dem Volumenstrom in m<sup>3</sup>/h sowie auf die Einheiten der Eingabegrößen Bezug nehmend, wird Gl. (3.30) als zugschnittene Größengleichung

$$ap + bp \dot{V} + cp \dot{V}^2 + dp \dot{V}^3 - \frac{1}{9,81} \left( \frac{\dot{V}}{3600 \cdot 28 \cdot 10^{-6} k_v^* PV} \right)^2 = H_1 - H_{PV} + \frac{p_{A,1} - p_{PV}}{9 \rho_W} 10^6 \quad (3.32)$$

geschrieben.

Setzt man in dieser Gleichung die linke Seite gleich  $H_F$  und die rechte Seite gleich  $H_F^*$ , so kann der im Abschnitt 2.2.2. beschriebene Iterationsablauf weitestgehend übernommen werden.

Im Bild 3.12 ist der komplette Datenflußplan als Unterprogramm **ABS-PV** dargestellt. Vor dessen Abarbeitung müssen jedoch die Ergebnisse des Unterprogramms **PA** vorliegen.

Eingabewerte (Bezugnahme auf Bild 3.11 und Tabelle 3.1)

|                 |                   |                                                                                                                                                                                                |
|-----------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pPV             | MPa               | Auflastdruck im Behälter<br>(Bei einem offenen Gefäß gilt pPV = 0,1 MPa.)                                                                                                                      |
| HPV             | m                 | Höhe des Wasserspiegels im Behälter<br>(Gleiche Bezugsebene wie für H1 wählen!)                                                                                                                |
| tPV             | °C                | Temperatur des Wassers im Behälter                                                                                                                                                             |
| ap              | }                 | Koeffizienten der Pumpenkennlinie<br>$H_F' = ap + bp \cdot \dot{V} + cp \cdot \dot{V}^2 + dp \cdot \dot{V}^3$<br>mit $H_F'$ in m und $\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /h                            |
| bp              |                   |                                                                                                                                                                                                |
| cp              |                   |                                                                                                                                                                                                |
| dp              |                   |                                                                                                                                                                                                |
| $\dot{V}_{MAX}$ | m <sup>3</sup> /h | Rechtsseitige Volumenstrombegrenzung der Pumpenkennlinie aus Pumpenkatalog oder Näherungswert für einen mittleren Förderstrom (Wird nur als Startwert für die iterative Ermittlung verwendet.) |
| $k_v^* PV$      | m <sup>3</sup> /h | Ventilkoeffizient der vollgeöffneten Stellarmatur einschl. der positiven Fertigungstoleranz<br>z.B. $k_v^* PV = 1,1 k_{VS}^*$                                                                  |

Unterprogramm **ABS - PV**

$\dot{m}W1PV = 0$ ;  $\dot{m}D1PV = 0$ ;  $\rho W1PV = 0$ ;  $\rho D1PV = 0$

Eingabe {pPV; HPV; tPV}

Eingabe {ap; bp; cp; dp;  $\dot{V}_{MAX}$ ;  $k_v^* PV$ }

Ausgabe {"Kontrolle der Eingabewerte: "}

Ausgabe {Alle Eingabedaten}

t = tPV

[ if  $V > 1$  then print  
"Variante >1 unzulässig!" : stop ]

**RHOW**

$H_F^* = H_1 - HPV + \frac{p_{A,1} - p_{PV}}{9,81 \cdot \rho_W} \cdot 10^6$

$\dot{V} = 0$ ;  $\dot{V}_0 = 0$ ;  $\dot{V}_{00} = 0$

$H_F = ap + bp \cdot \dot{V} + cp \cdot \dot{V}^2 + dp \cdot \dot{V}^3 - \frac{1}{9,81} \left( \frac{\dot{V}/3600}{28 \cdot 10^{-6} k_v^* PV} \right)^2$

P {  $\frac{|H_F - H_F^*|}{H_F^*} < 0,001$  }

0

P {  $\dot{V} = 0$  }

0

P {  $H_F < H_F^*$  }

0

$\dot{V} = \dot{V}_{MAX}$

1

P {  $H_F < H_F^*$  }

1

$\dot{V}_0 = \dot{V}$

P {  $\dot{V}_{00} = 0$  }

1

$\dot{V} = 0,9 \cdot \dot{V}_0$

1

2

$\dot{V} = 0,5 (\dot{V}_0 + \dot{V}_{00})$

1

3

$\dot{m}W1PV = \frac{\dot{V}}{3600} \cdot \rho_W$ ;  $\rho W1PV = \rho_W$

Ausgabe {"Abblasestrom des SV1

$\dot{m}W1PV =$ ;  $\dot{m}W1PV$ ; "kg/s"

"RHOW1PV =";  $\rho W1PV$ ; "kg/m<sup>3</sup>"}

**Bild 3.12** Flußplan des Unterprogramms **ABS-PV** (Abblasestrom-Pumpe-Stellventil-Kombination) zur Ermittlung der Abblaseströme infolge unkontrollierter Wasserzuströmung bei ungeregelter Pumpenförderung und Ausfall der Druckregelung

**Beispiel**

Für eine Schaltung nach Bild 3.11 gelten nachfolgende Daten:

$$\begin{aligned} p_{PV} &= 0,5 \text{ MPa} \\ t_{PV} &= 40 \text{ °C} \quad (\rightarrow \rho_W = 992,7 \text{ kg/m}^3) \\ H_{PV} &= 3 \text{ m}; \quad H_1 = 4 \text{ m} \\ k_{VS} &= 31,5 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

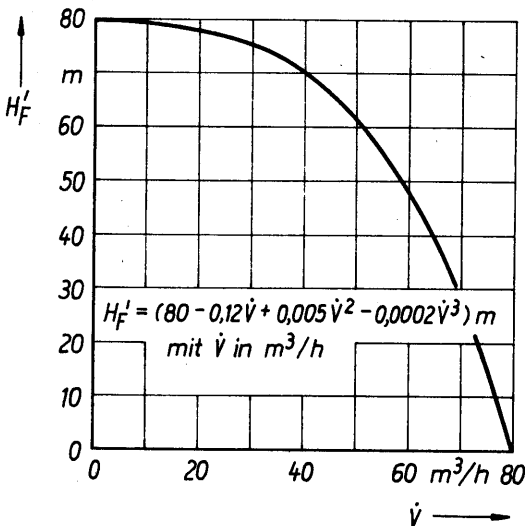
Der Abblasedruck des Sicherheitsventils SV1 sei mit  $p_{A,1} = 0,95 \text{ MPa}$  festgelegt. Es soll eine Pumpe mit der im Bild 3.13 gegebenen Kennlinie  $H_F'$  eingesetzt werden. Der bei Versagen der Druckregelung auftretende Abblasestrom des Sicherheitsventils ist zu bestimmen.

**Lösung**

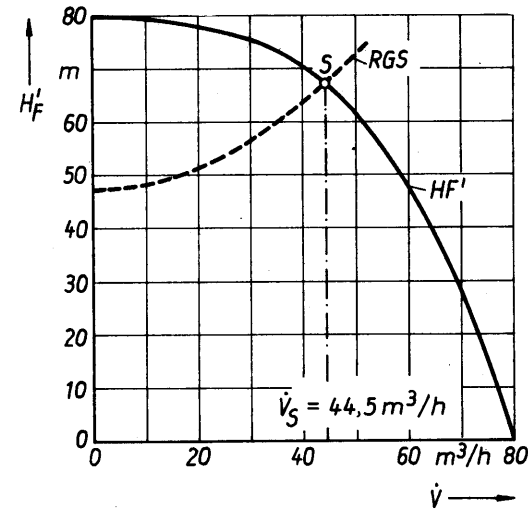
Der in Gl. (3.30) gesuchte Volumenstrom  $\dot{V}$  ergibt sich grafisch als Schnittpunkt der "rechten Gleichungsseite" RGS mit der gegebenen Pumpenkennlinie  $H_F'$ . Es werden deshalb zunächst die Terme der rechten Gleichungsseite zusammengefaßt in Abhängigkeit von  $\dot{V}$  berechnet:

$$RGS = \left[ 4 - 3 + \frac{1}{9,81} \left( \frac{\dot{V}}{3600 \cdot 28 \cdot 10^{-6} \cdot 31,5} \right)^2 + \frac{(0,95 - 0,5) \cdot 10^6}{9,81 \cdot 992,7} \right] \text{ m}$$

| $\dot{V}$ in $\text{m}^3/\text{h}$ | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| RGS in m                           | 47,2 | 48,2 | 51,3 | 56,3 | 63,4 | 72,5 |



**Bild 3.13** Kennlinie der im Beispiel betrachteten Pumpe



**Bild 3.14** Ermittlung des Schnittpunktes von Pumpen- und Netzkennlinie

Die Überlagerung dieses Kurvenzuges mit der Pumpenkennlinie liefert gemäß Bild 3.14 einen Schnittpunkt beim Volumenstrom  $\dot{V}_S = 44,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Damit beträgt der vom Sicherheitsventil abzublasende Massestrom

$$\dot{m}_{W,1} = \frac{44,5 \cdot 992,7}{3600} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 12,3 \text{ kg/s.}$$

Die automatisierte Berechnung nach Bild 3.12 liefert:

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E |       | Festlegung der Ansprechdrücke |  |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------|--|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>  |       |                               |  |
| Absicherungsvariante                | V =   | 1                             |  |
| Steuergröße                         | SG =  | 1                             |  |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1     | pA1 = | 0.9500 MPa                    |  |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1     | H1 =  | 4.000 m                       |  |
| Behälterfüllung                     | W =   | 1.0                           |  |

|                                                                                   |         |                          |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------|--|
| <b>LF:ABS-PV Unkontroll. Wasserzufluß über eine Pumpe-Stellventil-Kombination</b> |         |                          |  |
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                                |         |                          |  |
| Auflastdruck im Behälter                                                          | pPV =   | 0.500000 MPa             |  |
| Höhe des Wasserspiegels im Behälter                                               | HPV =   | 3.000 m                  |  |
| Temperatur des Wassers im Behälter                                                | tPV =   | 40 °C                    |  |
| Koeffizienten der Pumpenkennlinie                                                 | ap =    | 80.000                   |  |
| ( $HF = ap + bp \cdot V + cp \cdot V^2 + dp \cdot V^3$ in m ,                     | bp =    | -0.120000                |  |
| V in m <sup>3</sup> /h )                                                          | cp =    | 0.005000000              |  |
|                                                                                   | dp =    | -0.000200000000          |  |
| Max. Pumpenförderstrom (Näherung)                                                 | Vmax =  | 70.000 m <sup>3</sup> /h |  |
| Ventilkoeffizient mit Plustoleranz                                                | kv*PV = | 31.500 m <sup>3</sup> /h |  |

|                                  |           |         |                   |
|----------------------------------|-----------|---------|-------------------|
| <b>ERGEBNISSE:</b>               |           |         |                   |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom | mW1PV =   | 12.2116 | kg/s              |
| Dichte                           | RHOW1PV = | 992.1   | kg/m <sup>3</sup> |

### 3.2.2. Zuströmung von Wasser über eine Pumpe-Stellventil-Pumpe-Kombination

Bild 3.15 zeigt den Ausschnitt eines Heizwassernetzes, der die Umwälzpumpe UP und die Zuspiesung der dynamischen Druckhaltung mit der Druckdiktierpumpe DP und dem Stellventil V enthält. Der maximale Netzdruck werde durch das Sicherheitsventil SV1 begrenzt.

Bei einer unkontrollierten Einspeisung durch die Druckhalteanlage öffnet bei  $p_{A,1}$  das Sicherheitsventil. Der größte Mengenstrom ist abzuleiten, wenn die Pumpen DP und UP bei abgesperrtem Ventil X in Reihe geschaltet arbeiten.

Addiert man die beiden Pumpenkennlinien nach der für die Reihenschaltung gültigen Gesetzmäßigkeit, so kann für die resultierende Pumpe und das Stellventil der im Abschnitt 3.2.1. vorgestellte Algorithmus vollständig übernommen werden.

Die Approximation der resultierenden Kennlinie

$$H_F^i = a_p + b_p \dot{V} + c_p \dot{V}^2 + d_p \dot{V}^3 \quad (3.33)$$

ergibt sich bei Verwenden gleicher Einheiten aus den Einzelkennlinien

$$H_{F,DP}^i = a_{p_{DP}} + b_{p_{DP}} \dot{V} + c_{p_{DP}} \dot{V}^2 + d_{p_{DP}} \dot{V}^3$$

$$H_{F,UP}^i = a_{p_{UP}} + b_{p_{UP}} \dot{V} + c_{p_{UP}} \dot{V}^2 + d_{p_{UP}} \dot{V}^3$$

durch Addition der analogen Koeffizienten:

$$a_p = a_{p_{DP}} + a_{p_{UP}}$$

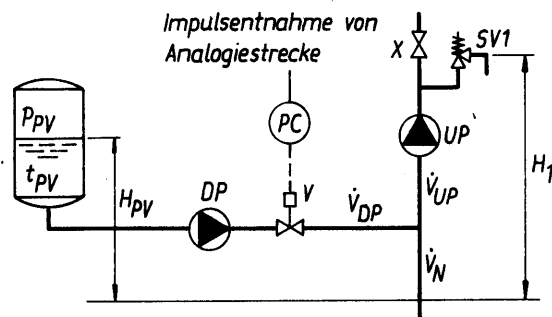
.

.

$$d_p = d_{p_{DP}} + d_{p_{UP}}.$$

(3.34)

Damit bedarf es keiner gesonderten Betrachtung des Lastfalls.



**Bild 3.15** Zuströmung von Wasser im Havariefall durch unkontrollierte Förderung zweier in Reihe geschalteter Pumpen und defekter Drosselregelung

## 3.3. Lastzuordnungen

Ein Anlagenteil – z.B. ein Behälter – wird in der Regel durch ein Sicherheitsventil abgesichert. Bei Wasserteilfüllung ist mitunter auch die Anbringung von zwei Sicherheitsventilen (Wasserraum und Gasraum) üblich. In Tabelle 2.1 wurden die möglichen Varianten dargestellt und im Abschnitt 2.1.1. definiert.

**Die Lastzuordnungen gelten im weiteren stets für das gegen Überdruck abgesicherte Anlagenteil.**

Bei den Varianten V=1 und V=2 beziehen sich diese somit auf ein Sicherheitsventil, bei V=3 und V=4 auf je zwei Sicherheitsventile. Wie sich bei der Doppelanordnung die Abblaseströme auf die einzelnen Sicherheitsvorrichtungen aufteilen, wird bei der hierarchisch untergeordneten Betrachtung des Lastfalles analysiert.

### 3.3.1. Vorschläge für typische Schaltungen

Die bisherigen Ausführungen des Abschnittes 3. zeigen deutlich, daß die Festlegung der Anschlußorte der Sicherheitsventile und deren Ansprechdrücke nicht nach einem dogmatischen Schema erfolgen kann. Vielmehr sind die eingangs formulierten Prämissen – zugeschnitten auf die jeweilige Schaltung und mögliche Belastung – ingenieurmäßig zu interpretieren und anzuwenden.

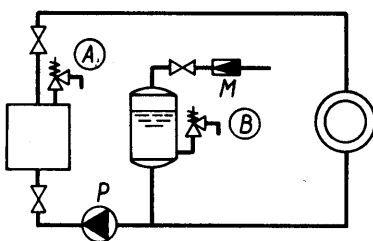
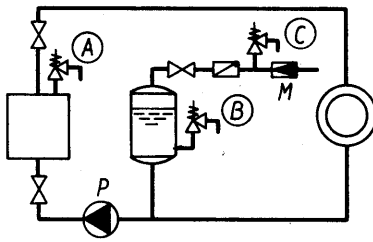
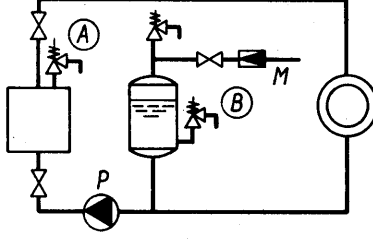
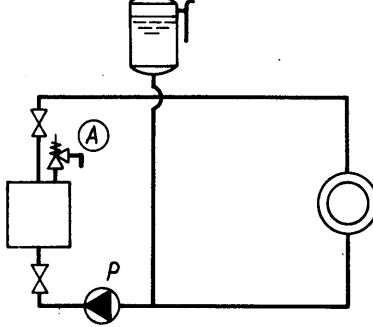
Die gewählten Anschlußorte können sich möglicherweise nach Auswerten der Druckschaubilder reduzieren. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Ruhe- und Betriebsdrücke von Netzen keine getrennte Absicherung erfordern. Infolgedessen müssen dann die getrennt ausgewiesenen Lastzuordnungen natürlich auf das jeweils installierte Sicherheitsventil vereinigt werden.

Bei den nachfolgend unterbreiteten Vorschlägen wird von der größten, denkbaren Differenzierung der Lastzuordnung – unter Beachten der Prämissen – ausgegangen. Die betrachteten Schaltungen stellen selbstverständlich nur Beispiele dar. Für abweichende Lösungen sind die Lastzuordnungen analog dazu vorzunehmen.

Als Ordnungsprinzip für die Zusammenstellung der möglichen Anlagenschaltungen und deren Absicherung seien die Druckhaltearten nach der herkömmlichen Unterteilung verwendet.

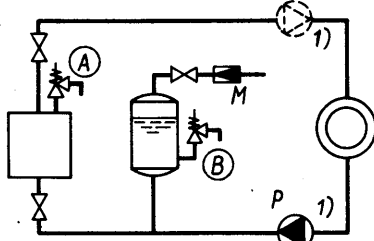
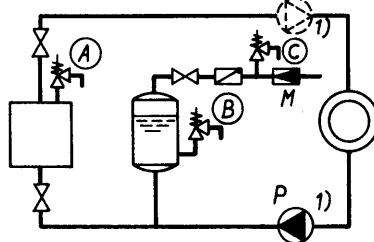
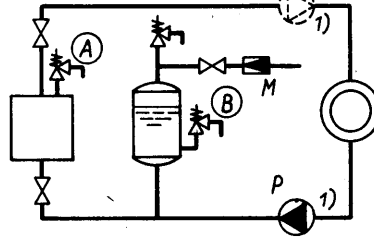
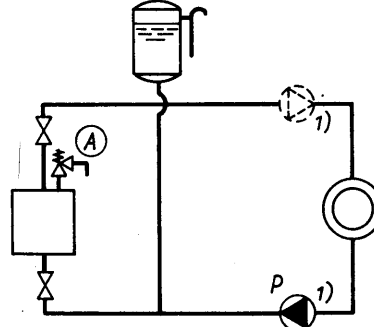
Die charakteristische Anlagenschaltung, die Anbringungsorte der Sicherheitsventile einschl. der Variante und die zu überprüfenden, relevanten Lastfälle werden tabellarisch zusammengestellt (Tabellen 3.2 bis 3.7).

Tabelle 3.2 Heizungsanlage mit statisch arbeitender Saugdruckhaltung

| Schaltung                                                                          | Anbringungsart                                                                                                | Variante                     | Relevante Lastfälle                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|    | (A) Wasserkessel<br>Wärmeübertrager (Dampf/Wasser)<br>Wärmeübertrager (Wasser/Wasser)<br>(B) Ausdehnungsgefäß | V1<br>V1(V2)<br>V1(V2)<br>V2 | P, H1, H7, H10<br>P, H2, H8, H11, RD<br>P, H3, H9, H12, R<br>M, H4 o. H5 o. H6 |
|    | (A) siehe oben<br>(B) Ausdehnungsgefäß<br>(C) Druckmedienzufluß                                               | V2<br>V1                     | H4 o. H5 o. H6<br>M                                                            |
|    | (A) siehe oben<br>(B) Ausdehnungsgefäß                                                                        | V3 o. V4                     | M, H4 o. H5 o. H6                                                              |
|  | (A) siehe oben                                                                                                |                              |                                                                                |

**Achtung!**  
Bei maschineller Ab-  
arbeitung H4 ... H6  
für (A) berechnen  
und die Ergebnisse  
als Zusatzlastfall  
für (B) eingeben!

Tabelle 3.3 Heizungsanlage mit statisch arbeitender Enddruckhaltung

| Schaltung                                                                             | Anbringungsart                                                                                                | Variante                     | Relevante Lastfälle                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|    | (A) Wasserkessel<br>Wärmeübertrager (Dampf/Wasser)<br>Wärmeübertrager (Wasser/Wasser)<br>(B) Ausdehnungsgefäß | V1<br>V1(V2)<br>V1(V2)<br>V2 | H1, H7, H10<br>H2, H8, H11, RD<br>H3, H9, H12, R<br>P, M, H4 o. H5 o. H6 |
|    | (A) siehe oben<br>(B) Ausdehnungsgefäß<br>(C) Druckmedienzufluß                                               | V2<br>V1                     | P, H4 o. H5 o. H6<br>M                                                   |
|    | (A) siehe oben<br>(B) Ausdehnungsgefäß                                                                        | V3 o. V4                     | P, M, H4 o. H5 o. H6                                                     |
|  | (A) siehe oben                                                                                                |                              |                                                                          |

**Achtung!**  
Bei maschineller Ab-  
arbeitung H4 ... H6  
für (A) berechnen  
und die Ergebnisse  
als Zusatzlastfall  
für (B) eingeben!

ohne H10 ... H12  
Anmerkung:  
1) Pumpe wahlweise  
im Vor- oder  
Rücklauf

Tabelle 3.4 Heizungsanlage mit dynamisch arbeitender Druckhaltung bei geregelter Zu- und Abseisung

| Schaltung | Anbringungsort                                                                             | Variante | Relevante Lastfälle                    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------|
|           | (A) Wasserkessel<br>Wärmeübertrager (Dampf/Wasser)                                         | V1       | H1, H7, H10                            |
|           | Wärmeübertrager (Wasser/Wasser)                                                            | V1(V2)   | H2, H8, H11, RD                        |
|           | Druckhaltung<br>(max. Betriebsdruck)                                                       | V1(V2)   | H3, H9, H12, R                         |
|           | Druckhaltung<br>(max. Ruhedruck)                                                           | V1       | P(UP), H4 o. H5 o. H6<br>PV(OP+UP, ZV) |
|           | Ausdehnungsgefäß                                                                           | V1       | PV(OP, ZV) 1)                          |
|           |                                                                                            | V2 o. V1 | V(AV), M                               |
|           | I { (A) bis (C) siehe oben<br>D) Ausdehnungsgefäß<br>E) Druckmedienzufluß                  | V2       | V(AV)                                  |
|           | II { (A) bis (C) siehe oben<br>D) Ausdehnungsgefäß                                         | V1       | M                                      |
|           | III { (A) bis (C) siehe oben                                                               | V3 o. V4 | V(AV), M                               |
|           | Anmerkung:<br>1) Bei Pumpenausfall wird die<br>Absperung der Wärmezufuhr<br>vorausgesetzt. |          |                                        |

Spezielle Gestaltung der Ausdehnungsanlage

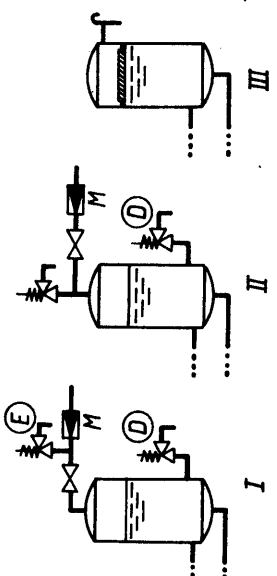
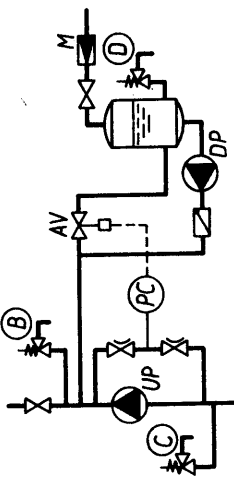


Tabelle 3.5 Heizungsanlage mit dynamisch arbeitender Druckhaltung bei geregelter Abseisung

| Schaltung                                                                                  | Anbringungsort                                     | Variante | Relevante Lastfälle             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------|---------------------------------|
|                                                                                            | (A) Wasserkessel<br>Wärmeübertrager (Dampf/Wasser) | V1       | H1, H7, H10                     |
|                                                                                            | Wärmeübertrager (Wasser/Wasser)                    | V1(V2)   | H2, H8, H11, RD                 |
|                                                                                            | Druckhaltung<br>(max. Betriebsdruck)               | V1(V2)   | H3, H9, H12, R                  |
|                                                                                            | Druckhaltung<br>(max. Ruhedruck)                   | V1       | P(UP), H4 o. H5<br>o. H6, P(OP) |
|                                                                                            | Ausdehnungsgefäß                                   | V1       | P(OP) 1)                        |
|                                                                                            |                                                    | V2 o. V1 | V(AV), M                        |
|                                                                                            |                                                    |          |                                 |
|                                                                                            |                                                    |          |                                 |
|                                                                                            |                                                    |          |                                 |
|                                                                                            |                                                    |          |                                 |
| Anmerkung:<br>1) Bei Pumpenausfall wird die<br>Absperung der Wärmezufuhr<br>vorausgesetzt. |                                                    |          |                                 |

Spezielle Gestaltung der Druckhalteanbindung



Spezielle Gestaltung des Ausdehnungsgefäßes - siehe vorherige Tabelle

Tabelle 3.6 Heizungsanlage mit statisch-dynamischer Druckhalteanlage

| Schaltung | Anbringungsort                        | Variante | Relevante Lastfälle                                                                    |
|-----------|---------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|           | (A) Wasserkessel                      | V1       | H1, H7, H10                                                                            |
|           | Wärmeübertrager (Dampf/Wasser)        | V1(V2)   | H2, H8, H11, RD                                                                        |
|           | Wärmeübertrager (Wasser/Wasser)       | V1(V2)   | H3, H9, H12, R                                                                         |
|           | (B) Druckhaltung (max. Betriebsdruck) | V1       | P(UP), H4 o. H5 o. H6, PV(UP, ZV)                                                      |
|           | (C) Druckhaltung (max. Ruhedruck)     | V1       | V(ZV) 1)                                                                               |
|           | (D) Ausdehnungsgefäß                  | V2 o. V1 | V(AV), M                                                                               |
|           | (A) bis (C) siehe oben                |          |                                                                                        |
|           | (D) Pufferspeicher                    | V2 o. V1 | V(AV), M(M1)                                                                           |
|           | (E) Ausdehnungsgefäß                  | V2 o. V1 | P(SP), M(M2)                                                                           |
|           |                                       |          | Anmerkung:<br>1) Bei Pumpenausfall wird die Abspernung der Wärmezufuhr vör-ausgesetzt. |

Tabelle 3.7 Heizungsanlage mit nachgeschalteter Druckhalteanlage

| Schaltung | Anbringungsort                      | Variante | Relevante Lastfälle |
|-----------|-------------------------------------|----------|---------------------|
|           | (A) Wärmeübertrager (Wasser/Wasser) | V1(V2)   | H3, H9, H12, R      |
|           | (B) Druckhaltung                    | V1       | P(UP), H6, V(ZV)    |
|           | (C) Pufferspeicher                  | V2 o. V1 | V(AV), M            |
|           | (A) Druckhaltung                    | V1       | V                   |
|           | (B) WW-Bereitung                    | V1       | R, H3, H9, H12      |



Das Unterprogramm [PA], in dem die Ansprechdrücke benannt oder ermittelt werden, ist stets abzuarbeiten und deshalb im Flußplan fest integriert. Die Eingabewerte und die Ergebnisse werden in der Datei "Behälter" gespeichert.

Die Unterprogramme zur Berechnung der Abblaseströme [ABS-X] sind entsprechend der Eingabenennung als [ABS-P], [ABS-RD], [ABS-H10] usw. aufzurufen.

Im Ergebnis erhält man die Masseströme und Dichten, die zur Bemessung des Sicherheitsventils bedeutungsvoll sind. Die Bezeichnungen dieser Größen sind in den Unterprogrammen spezifiziert. Sie werden in die Datei "Lastannahmen" übertragen.

Zusätzlich erfolgt die Übernahme der Temperaturen und der Druckmedienart gemäß dem im Bild 3.17 gezeigten Dateiaufbau.

Es ist möglich, den gleichen Lastfall mehrmals aufzurufen. Dies könnte notwendig sein, wenn beispielsweise zwei Pumpen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen in einen Behälter fördern oder wenn zwei verschiedene Druckmedienleitungen über getrennte Druckminderer an einem Druckgefäß angeschlossen sind.

Die von vornherein nicht relevanten Lastfälle sollten bei der Eingabe unbeachtet bleiben.

Werden weitere Lastfälle als Unterprogramme erarbeitet, so können diese jederzeit bei der Zusammenstellung in [LZO] Beachtung finden.

Es besteht auch die Möglichkeit, eine manuell ermittelte Lastannahme als zusätzlichen Lastfall Z zu berücksichtigen.

#### Eingabewerte

|                  |                   |                       |   |             |   |                                         |
|------------------|-------------------|-----------------------|---|-------------|---|-----------------------------------------|
| $\dot{m}W1Z$     | kg/s              | Abblasestrom          | } | Wasser      | } | Belastung des<br>Sicherheitsventils SV1 |
| $\rho W1Z$       | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                |   |             |   |                                         |
| $\dot{m}WD1Z$    | kg/s              | Abblasestrom          | } | Wasserdampf |   |                                         |
| $\rho WD1Z$      | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                |   |             |   |                                         |
| $\dot{m}D1Z$     | kg/s              | Abblasestrom          | } | Druckmedium |   |                                         |
| $\rho D1Z$       | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                |   |             |   |                                         |
| $\dot{m}W2Z$     | kg/s              | Abblasestrom          | } | Wasser      | } | Belastung des<br>Sicherheitsventils SV2 |
| $\rho W2Z$       | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                |   |             |   |                                         |
| $\dot{m}D2Z$     | kg/s              | Abblasestrom          | } | Druckmedium |   |                                         |
| $\rho D2Z$       | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                |   |             |   |                                         |
| $\overline{tW}$  | °C                | Wassertemperatur      |   |             |   |                                         |
| $\overline{tWD}$ | °C                | Wasserdampftemperatur |   |             |   |                                         |
| $\overline{tD}$  | °C                | Druckmedientemperatur |   |             |   |                                         |
| DP               | -                 | Art des Druckmediums  |   |             |   |                                         |

Mit der Mehrfachbearbeitung der Lastfälle und der Zusatzeingabe ist eine Universalität erreicht, die auch der weiteren Entwicklung gerecht werden müßte.

| i  | LF[i] | $\dot{m}W1[i]$ | $\rho W1[i]$ | $\dot{m}WD1[i]$ | $\rho WD1[i]$ | $\dot{m}D1[i]$ | $\rho D1[i]$ | $\dot{m}W2[i]$ | $\rho W2[i]$ | $\dot{m}D2[i]$ | $\rho D2[i]$ | $\overline{tW}[i]$ | $\overline{tWD}[i]$ | $\overline{tD}[i]$ | DP[i] |
|----|-------|----------------|--------------|-----------------|---------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------|
| 1  | P     | $\dot{m}W1P$   | $\rho W1P$   | 0               | 0             | $\dot{m}D1P$   | $\rho D1P$   | $\dot{m}W2P$   | $\rho W2P$   | 0              | 0            | tP                 | 0                   | tDN                | DP    |
| 2  | V     | $\dot{m}W1V$   | $\rho W1V$   | $\dot{m}WD1V$   | $\rho WD1V$   | $\dot{m}D1V$   | $\rho D1V$   | $\dot{m}W2V$   | $\rho W2V$   | 0              | 0            | tVS                | tVSS                | tDN                | DP    |
| 3  | M     | 0              | 0            | 0               | 0             | $\dot{m}D1M$   | $\rho D1M$   | $\dot{m}W2M$   | $\rho W2M$   | $\dot{m}D2M$   | $\rho D2M$   | tWN                | 0                   | tMS                | DP    |
| 4  | R     | $\dot{m}W1R$   | $\rho W1R$   | $\dot{m}WD1R$   | $\rho WD1R$   | $\dot{m}D1R$   | $\rho D1R$   | $\dot{m}W2R$   | $\rho W2R$   | 0              | 0            | tRS                | tRSS                | tDN                | DP    |
| 5  | RD    | 0              | 0            | $\dot{m}WD1RD$  | $\rho WD1RD$  | 0              | 0            | 0              | 0            | 0              | 0            | 0                  | t                   | 0                  | 0     |
| 6  | H1    | $\dot{m}W1H1$  | $\rho W1H1$  | 0               | 0             | 0              | 0            | $\dot{m}W2H1$  | $\rho W2H1$  | 0              | 0            | t                  | 0                   | 0                  | 0     |
| 7  | H2    | $\dot{m}W1H2$  | $\rho W1H2$  | 0               | 0             | 0              | 0            | $\dot{m}W2H2$  | $\rho W2H2$  | 0              | 0            | t                  | 0                   | 0                  | 0     |
| 8  | H3    | $\dot{m}W1H3$  | $\rho W1H3$  | 0               | 0             | 0              | 0            | $\dot{m}W2H3$  | $\rho W2H3$  | 0              | 0            | t                  | 0                   | 0                  | 0     |
| 9  | H4    | $\dot{m}W1H4$  | $\rho W1H4$  | 0               | 0             | 0              | 0            | $\dot{m}W2H4$  | $\rho W2H4$  | 0              | 0            | t                  | 0                   | 0                  | 0     |
| 10 | H5    | $\dot{m}W1H5$  | $\rho W1H5$  | 0               | 0             | 0              | 0            | $\dot{m}W2H5$  | $\rho W2H5$  | 0              | 0            | t                  | 0                   | 0                  | 0     |
| 11 | H6    | $\dot{m}W1H6$  | $\rho W1H6$  | 0               | 0             | 0              | 0            | $\dot{m}W2H6$  | $\rho W2H6$  | 0              | 0            | t                  | 0                   | 0                  | 0     |
| 12 | H7    | 0              | 0            | $\dot{m}WD1H7$  | $\rho WD1H7$  | 0              | 0            | 0              | 0            | 0              | 0            | 0                  | t                   | 0                  | 0     |
| 13 | H8    | 0              | 0            | $\dot{m}WD1H8$  | $\rho WD1H8$  | 0              | 0            | 0              | 0            | 0              | 0            | 0                  | t                   | 0                  | 0     |
| 14 | H9    | 0              | 0            | $\dot{m}WD1H9$  | $\rho WD1H9$  | 0              | 0            | 0              | 0            | 0              | 0            | 0                  | t                   | 0                  | 0     |
| 15 | H10   | $\dot{m}W1H10$ | $\rho W1H10$ | $\dot{m}WD1H10$ | $\rho WD1H10$ | 0              | 0            | $\dot{m}W2H10$ | $\rho W2H10$ | 0              | 0            | tHS                | tHSS                | 0                  | 0     |
| 16 | H11   | $\dot{m}W1H11$ | $\rho W1H11$ | $\dot{m}WD1H11$ | $\rho WD1H11$ | 0              | 0            | $\dot{m}W2H11$ | $\rho W2H11$ | 0              | 0            | tHS                | tHSS                | 0                  | 0     |
| 17 | H12   | $\dot{m}W1H12$ | $\rho W1H12$ | $\dot{m}WD1H12$ | $\rho WD1H12$ | 0              | 0            | $\dot{m}W2H12$ | $\rho W2H12$ | 0              | 0            | tHS                | tHSS                | 0                  | 0     |
| 18 | PV    | $\dot{m}W1PV$  | $\rho W1PV$  | 0               | 0             | $\dot{m}D1PV$  | $\rho D1PV$  |                |              | 0              | 0            | tPV                | 0                   | 0                  | 0     |
| 19 | Z     | $\dot{m}W1Z$   | $\rho W1Z$   | $\dot{m}WD1Z$   | $\rho WD1Z$   | $\dot{m}D1Z$   | $\rho D1Z$   | $\dot{m}W2Z$   | $\rho W2Z$   | $\dot{m}D2Z$   | $\rho D2Z$   | $\overline{tW}$    | $\overline{tWD}$    | $\overline{tD}$    | DP    |

Bild 3.17 Aufbau der Datei "Lastannahmen" zur Speicherung der Ergebnisse aller relevanten Lastfälle (Die aufgeführten Lastfälle können auch mehrfach vorkommen.)

### 3.3.3. Beispiel

Die im Bild 3.8 dargestellte Heizungsanlage ist im Beispiel 3.1.5. untersucht worden. Im Ergebnis wurde festgestellt, daß der Anlagenbetrieb mit einer statischen Enddruckhaltung realisierbar ist. Die Ansprechdrücke betragen:

Sicherheitsventil (A) (Wärmeübertrager):  $p_{A,A} = 0,865 \text{ MPa}$

Sicherheitsventil (B) (Ausdehnungsgefäß):  $p_{A,B} = 0,850 \text{ MPa}$ .

Es sind die Lastzuordnungen vorzunehmen und die Belastungen für beide Sicherheitsventile zu bestimmen, wenn folgende Detailwerte gelten:

Wärmeübertrager (Dampf/Wasser):

|                            |                                        |
|----------------------------|----------------------------------------|
| Heizdampfdruck (Sattdampf) | $p_H = 0,48 \text{ MPa}$               |
| Heizfläche                 | $A = 80 \text{ m}^2$                   |
| Wärmedurchgangskoeffizient | $k' = 2000 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  |
|                            | $k'' = 2500 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ |
| Höhe Sicherheitsventil (A) | $H_1 = 4 \text{ m}$                    |

Umwälzpumpe:

|                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| Maximaler Förderdruck | $\Delta p_P = 400 \text{ kPa}$ |
| Normaler Förderstrom  | $\dot{m}_P = 35 \text{ kg/s}$  |

Ausdehnungsgefäß:

|                            |                                      |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Wassertemperatur           | $t_{WN} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Höhe Sicherheitsventil (B) | $H_2 = 2 \text{ m}$                  |

Stickstoff-Druckminderer:

|                                          |                                                |
|------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Vordruck                                 | $p_M = 2,5 \text{ MPa}$                        |
| Temperatur                               | $t_M = 20 \text{ }^\circ\text{C}$              |
| Höhe Druckminderer                       | $H_M = 4 \text{ m}$                            |
| Ventilkoeffizient                        | $k_V^* = (0,2 \pm 15 \%) \text{ m}^3/\text{h}$ |
| Modifiziertes kritisches Druckverhältnis | $x_T = 0,55$                                   |

#### Lösung

Die vorliegende Schaltung entspricht im wesentlichen der oberen Darstellung in Tabelle 3.3, wobei sich die Pumpe im Rücklauf befindet. Somit gelten folgende Lastzuordnungen:

Sicherheitsventil (A) (Variante V=1): H2; H8; H11; RD

Sicherheitsventil (B) (Variante V=2): P; M; H5.

Im weiteren sind die einzelnen Lastfälle zu untersuchen.

Zum vorgegebenen Sattdampfdruck gehört eine Temperatur von  $t_H = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Lastannahmen für Sicherheitsventil (A)

#### Lastfall H2

Der Abblasestrom ergibt sich nach Gl. (2.66)

$$\dot{m} = \varrho \frac{dv}{dt} (t_H - t) \frac{k' A'}{c}$$

Die relevante Temperatur berechnet sich nach Gl. (2.63)

$$t = (0,37 \cdot 150 + 8) \text{ }^\circ\text{C} = 63,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Damit kann aus Tabelle 2.7 der Interpolationswert

$$\varrho \frac{dv}{dt} (t_H - t) = 47528 \cdot 10^{-6}$$

abgelesen werden. Schließlich folgt der Abblasestrom

$$\dot{m} = 47528 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2000 \cdot 80}{4,2 \cdot 10^3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,81 \text{ kg/s}.$$

Mit den in Tabelle 2.8 festgelegten Bezeichnungen gelten:

$$\dot{m}_{W1H2} = 1,81 \text{ kg/s}; \quad \varrho_{W1H2} = \varrho_W(63,5 \text{ }^\circ\text{C}) = 981 \text{ kg/m}^3.$$

#### Lastfall H8

Zum Ansprechdruck  $p_{A,A} = 0,865 \text{ MPa}$  gehört die Siedetemperatur  $t_S = 174 \text{ }^\circ\text{C}$ . Da der Heizdampf nur eine Temperatur von  $t_H = 150 \text{ }^\circ\text{C}$  aufweist, kann das Wasser auf der Sekundärseite nicht verdampfen. Somit ist

$$\dot{m}_{WD1H8} = 0.$$

#### Lastfall H11

Dieser Lastfall ist nicht relevant, denn käme es zu einer unkontrollierten Pumpenförderung, so würde gemäß Lastfall P das Sicherheitsventil (B) belastet. Es gelten:

$$\dot{m}_{W1H11} = 0; \quad \dot{m}_{WD1H11} = 0.$$

#### Lastfall RD

Da der Dampfdruck  $p_H$  kleiner als der Ansprechdruck  $p_{A,A}$  ist, entstünde auch bei einem Rohrbruch in der Heizfläche keine Belastung für das Sicherheitsventil. Damit folgt mit der Bezeichnung nach Tabelle 2.6

$$\dot{m}_{WD1RD} = 0.$$

## Lastannahmen für Sicherheitsventil (B)

## Lastfall P

Wird das Rohrnetz an der höchsten Stelle belüftet, so ergäbe sich nach Bild 2.6 (Form A) der Druck am Pumpensaugstutzen

$$p_P = (0,1 \cdot 10^6 + 9,81 \cdot 999 \cdot 5) \text{ Pa} = 0,15 \text{ MPa.}$$

Für die Absicherungsvariante V=2 berechnet sich nach Gl. (2.22) die notwendige Pumpenförderhöhe zu

$$H_F^* = \left[ \frac{0,850 - 0,150}{9,81 \cdot 999} \cdot 10^6 + (2 - 0) \right] \text{ m} = 73,4 \text{ m.}$$

Die maximale Förderhöhe der Pumpe beträgt jedoch nur  $H_{F,\max} \approx 40 \text{ m}$ ; somit wird das Sicherheitsventil nicht belastet. Es gilt gemäß Tabelle 2.2:

$$\dot{m}_{W2P} = 0.$$

## Lastfall M

Die Dichte des Stickstoffs vor dem Druckminderer berechnet sich nach Gl. (A2) des Anhangs zu

$$\rho_M = \frac{10^6 \cdot 2,5}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 29,422 \text{ kg/m}^3.$$

Im weiteren sind zwei zeitliche Phasen des Abblasens zu unterscheiden. Es sei nach Tabelle 2.4 einfachheitshalber zunächst die Phase II untersucht, wobei sich der Wasserstand unterhalb der Anbindung von Sicherheitsventil (B) befindet. Im Ansprechfall beträgt der Gasdruck im Behälter nach Gl. (2.51)

$$p_{ND} = 0,850 \text{ MPa.}$$

Die zugehörige Dichte berechnet sich gemäß Gl. (2.47)

$$\rho_D = \frac{10^6 \cdot 0,850}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 10,004 \text{ kg/m}^3.$$

Gl. (2.42) liefert

$$x = \min \left\{ \frac{2,5 - 0,850}{2,5}; \frac{1,4}{1,4} \cdot 0,55 \right\} = 0,55.$$

Schließlich ist Gl. (2.41) auswertbar:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,028 \cdot 0,23 \cdot \left( 1 - \frac{0,55}{2,143 \cdot 1,4 \cdot 0,55} \right) \cdot \sqrt{0,55 \cdot 2,5 \cdot 29,422} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ &= 0,027 \text{ kg/s.} \end{aligned}$$

Nunmehr ist Phase I zu betrachten, wobei angenommen wird, daß der Wasserstand bis in Höhe des Druckminderers reicht. Damit ergibt sich der Nachdruck gemäß Gl. (2.54)

$$p_{ND} = [0,850 \cdot 10^6 - 9,81 \cdot 999 \cdot (4 - 2)] \text{ Pa} = 0,830 \text{ MPa.}$$

Die weitere Berechnung erfolgt in den bekannten Schritten, wobei infolge der überkritischen Armaturendurchströmung

$$x = \min \left\{ \frac{2,5 - 0,830}{2,5}; 0,55 \right\} = 0,55$$

und damit der Massestrom

$$\dot{m} = 0,027 \text{ kg/s}$$

unverändert gelten.

Die Gasdichte ist nach Gl. (2.47) neu zu bestimmen:

$$\rho_D = \frac{10^6 \cdot 0,830}{290 \cdot (20 + 273)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9,768 \text{ kg/m}^3.$$

Die Umrechnung auf den volumengleichen Wasserstrom ergibt nach Gl. (2.55)

$$\dot{m}_{W,2} = 0,027 \frac{999}{9,768} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 2,76 \text{ kg/s.}$$

Zusammenfassend gelten mit den in Tabelle 2.4 gewählten Bezeichnungen für die Lastannahmen:

$$\text{Phase I} \quad \dot{m}_{W2M} = 2,76 \text{ kg/s}; \quad \rho_{W2M} = 999 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Phase II} \quad \dot{m}_{D2M} = 0,027 \text{ kg/s}; \quad \rho_{D2M} = 10 \text{ kg/m}^3.$$

## Lastfall H5

Um Gl. (2.73) auswerten zu können, ist der Term  $\rho \, dv/dt (t_H - t)$  zu bestimmen. Für ihn gilt der gleiche Wert, wie er für Lastfall H2 bereits ermittelt wurde.

Der Exponent beträgt:

$$\frac{k' A'}{\dot{C}_Z} = \frac{2000 \cdot 80}{35 \cdot 4200} = 1,088.$$

Schließlich liefert Gl. (2.73)

$$\dot{m} = 47528 \cdot 10^{-6} \cdot 35 \frac{1}{\frac{1}{1 - e^{-1,088}} - 0,5} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,65 \text{ kg/s.}$$

Die Dichte hat den gleichen Wert wie bei Lastfall H2.

Zusammenfassend gelten mit den Bezeichnungen der Tabelle 2.8:

$$\dot{m}_{W1H5} = 1,65 \text{ kg/s}; \quad \rho_{W1H5} = 981 \text{ kg/m}^3.$$

Die nachfolgenden Protokolle weisen die mit Hauptprogramm **LZO** ermittelten Ergebnisse aus:

### Sicherheitsventil (A)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |                  |
| Absicherungsvariante                                                   | V = 1            |
| Steuergröße                                                            | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV1                                        | pA1 = 0.8650 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV1                                        | H1 = 4.000 m     |
| Behälterfüllung                                                        | W = 1.0          |

| LF:ABS-H2 Dampfbeheizte Heizfläche/Abgesperrter Wasserbehälter |                       |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                             |                       |
| Konstante Heizmedientemperatur                                 | tH = 150 °C           |
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wassererwärmer                      | k' = 2000 W/(m²K)     |
| Heizfläche des Wassererwärmers                                 | A' = 80.000 m²        |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                             |                       |
| Abblasestrom des SV1: Massestrom                               | mW1H2 = 1.8337 kg/s   |
| Dichte                                                         | RHOW1H2 = 981.6 kg/m³ |

| LF:ABS-H8 Dampfbeheizte Heizfläche/Abgesperrter Verdampfer |                    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                         |                    |
| Konstante Heizmedientemperatur                             | tH = 150 °C        |
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wasserverdampfer                | k'' = 2500 W/(m²K) |
| Wassererwärmer und -verdampfer AG = A' + A''               | AG = 80.000 m²     |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                         |                    |
| *** Lastfall H8 unzutreffend ! ***                         |                    |

### Sicherheitsventil (B)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E      Festlegung der Ansprechdrücke |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                     |                  |
| Absicherungsvariante                                                   | V = 2            |
| Steuergröße                                                            | SG = 1           |
| Gegebener Ansprechdruck für SV2                                        | pA2 = 0.8500 MPa |
| Höhe des Sicherheitsventils SV2                                        | H2 = 2.000 m     |
| Behälterfüllung                                                        | W = 0.5          |
| Art des Druckmediums                                                   | DP = 1           |
| Temperatur im Behälter bei Normalbetrieb                               |                  |
| Wasser                                                                 | tWN = 20 °C      |
| Druckmedium                                                            | tDN = 20 °C      |

| LF:ABS-P Unkontrollierter Wasserzufluß durch Pumpenförderung                 |                      |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                           |                      |
| Druck an einem Punkt in der Saugrohrleitung                                  | pRP = 0.100000 MPa   |
| Vorzeichenbehaftete Höhe dieses Punktes bezogen auf den Pumpensaugstutzen    | HRP = 5.000 m        |
| Temperatur des zuströmenden Wassers                                          | tP = 20 °C           |
| Höhe des Pumpensaugstutzens                                                  | HP = 0.000 m         |
| Koeffizienten der Pumpenkennlinie                                            | ap = 40.000          |
| ( $HF = ap + bp \cdot V + cp \cdot V^2 + dp \cdot V^3$ in m ,<br>V in m³/h ) | bp = -0.040000       |
|                                                                              | cp = -0.000320000    |
|                                                                              | dp = 0.000000000000  |
| Max. Pumpenförderstrom (Näherung)                                            | Vmax = 150.000 m³/h  |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                           |                      |
| Druck am Pumpensaugstutzen                                                   | pP = 0.148961 MPa    |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                                             | mW2P = 0.0000 kg/s   |
| Dichte                                                                       | RHOW2P = 998.2 kg/m³ |

| LF:ABS-M Unkontrollierter Druckmedienzufluß über einen Druckminderer |                       |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                                   |                       |
| Druck vor dem Druckminderer                                          | pM = 2.500000 MPa     |
| Höhe des Armatureneintritts                                          | HM = 4.000 m          |
| Temperatur des zuströmenden Druckmediums                             | tM = 20 °C            |
| Charakteristik des Drosselorgans                                     | CHAR = 1              |
| Ventilkoeffizient mit Plustoleranz                                   | kv* = 0.230 m³/h      |
| Modif. kritisches Differenzdruckverhältnis                           | xT = 0.55             |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                                   |                       |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                                     | mD2M = 0.0273 kg/s    |
| Dichte                                                               | RHOD2M = 10.004 kg/m³ |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                                     | mW2M = 2.7892 kg/s    |
| Dichte                                                               | RHOW2M = 998.2 kg/m³  |

| LF:ABS-H5 Dampfbeheizte Heizfläche/Geschlossener Kreislauf |                       |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>KONTROLLE DER EINGABEWERTE:</b>                         |                       |
| Wasserzufluß in den Wärmebereitsteller                     | mZ = 35.000 kg/s      |
| Konstante Heizmedientemperatur                             | tH = 150 °C           |
| Wärmedurchgangskoeffizient-Wassererwärmer                  | k' = 2000 W/(m²K)     |
| Heizfläche des Wassererwärmers                             | A' = 80.000 m²        |
| <b>ERGEBNISSE:</b>                                         |                       |
| Abblasestrom des SV2: Massestrom                           | mW2H5 = 1.6708 kg/s   |
| Dichte                                                     | RHOW2H5 = 981.6 kg/m³ |

## 4. Sicherheitsventile

Die Sicherheitsventile stellen derzeit die Hauptgruppe innerhalb des Komplexes "Sicherheitsvorrichtungen" dar.

Kennzeichnend für die **Funktionsweise der Sicherheitsventile** sind:

- Selbsttätiges Öffnen bei Erreichen des Ansprechdruckes;
- Stabiles Ableiten des im Druckteil befindlichen Mediums bei weiterem Druckanstieg;
- Selbsttätiges Schließen nach Eintreten einer bestimmten Druckabsenkung.

Zwei besonders diffizile Probleme sind die **Dichtheit** und die **Ansprechgenauigkeit**. Beide Anforderungen stellen einen Qualitätsmaßstab dar, wobei sich die genannten Eigenschaften während der gesamten Betriebszeit möglichst nicht verschlechtern sollten.

Dichtheit und Ansprechgenauigkeit haben eine gleiche ursächliche Bezugsbasis. Es ist die Dichtkraft, die sich aus der Sitzfläche und der Druckdifferenz zwischen Ansprechdruck  $p_A$  und herrschendem Betriebsdruck  $p_N$  (vgl. Bild 1.1) ergibt. Diese Druckdifferenz - sie wird auch **Arbeitsdruckdifferenz des Venils** genannt - möchte man zur wirtschaftlichen Auslastung der Anlagen auch bei großem  $p_A$  in der Regel gering halten. Sie ist mit zunehmendem Ansprechdruck, kleiner werdendem Sitzdurchmesser und bei vorhandener äußerer Schwingungsbelastung größer zu wählen. In /21/ werden empfohlen:

| Ansprechüberdruck in MPa     | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | $\geq 1$ |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
| Arbeitsdruckdifferenz in %   |     |     |     |     |          |
| Sitzdurchmesser < 20 mm      | 30  | 25  | 22  | 21  | 18       |
| Sitzdurchmesser $\geq 20$ mm | 22  | 17  | 14  | 12  | 9        |

Folgende Leckraten werden als übliche Prüfstandswerte für Luft genannt:

Metallsitz:  $10^{-3}$  mbar l/s; Weichdichtung:  $10^{-5}$  mbar l/s.

(Für die Dichtheitsprüfung gemäß Druckanstiegsmethode gilt die Definition: 1 mbar l/s entspricht der Leckage, die in einem evakuierten Gefäß von 1 Liter in 1 Sekunde einen Druckanstieg von 1 mbar bewirkt. Der atmosphärische Druck außerhalb des Behälters ist dabei 1 bar.)

### 4.1. Einteilung und Funktionsweise

Nach /26/ sind geringere Arbeitsdruckdifferenzen möglich:

| Ansprechdruck in MPa       | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | $\geq 1$ |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
| Arbeitsdruckdifferenz in % |     |     |     |     |          |
| Kleine Sitzdurchmesser     | 21  | 16  | 15  | 14  | 12,5     |
| Große Sitzdurchmesser      | 15  | 12  | 10  | 9   | 7,5      |

Die Leckraten liegen dann allerdings höher als die oben genannten Werte.

Nach /22/ wird auf dem Prüfstand für alle Sicherheitsventile - auch bei mehrmaligem Ansprechen - eine Genauigkeit des Ansprechdruckes von  $\pm 1$  % garantiert. Für den Praxiseinsatz eines federbelasteten Sicherheitsventils wird allerdings die Ansprechgenauigkeit in Abhängigkeit des Druckes gemäß nachfolgender Tabelle für realistisch gehalten:

| Ansprechdruck in MPa | 5   | 1   | 0,3   | < 0,3          |
|----------------------|-----|-----|-------|----------------|
| Ansprechgenauigkeit  | 3 % | 4 % | 6,6 % | $\pm 0,02$ MPa |

In /1/ wird die Ansprechdrucktoleranz mit 1 ... 3 % eingeschätzt.

### 4.1. Einteilung und Funktionsweise

Die im Bild 4.1 dargestellten schematischen Schnittzeichnungen von Sicherheitsventilen nach /19/ zeigen einige typische Konstruktionsprinzipien.

Nach der **Belastungsart** und **Gehäusegestaltung** werden unterschieden:

- **Massebelastete** Sicherheitsventile
  - Unmittelbare Massebelastung (Form A)
  - Mittelbare Massebelastung unter Zwischenschalten eines Hebels (Form B)
- **Federbelastete** Sicherheitsventile
  - Geschlossene Haube über der Feder (Form C)
  - Offene Haube über der Feder (Form D und E).

Üblicherweise werden **federbelastete Sicherheitsventile mit geschlossener Haube** eingesetzt (Form C).

Offene Häuben ermöglichen die Kühlung der Feder durch die Umgebungsluft. Sie sind jedoch wegen der nicht abgedichteten Spindelführung aus Gründen des Arbeitsschutzes nur eingeschränkt anwendbar (Form D). Bei Form E wird die Spindelabdichtung durch einen **Faltenbalg** erreicht. Da innerhalb des Faltenbalges der Atmosphärendruck wirkt, sind die Ansprechdrücke weitestgehend **gedrucktunempfindlich**!

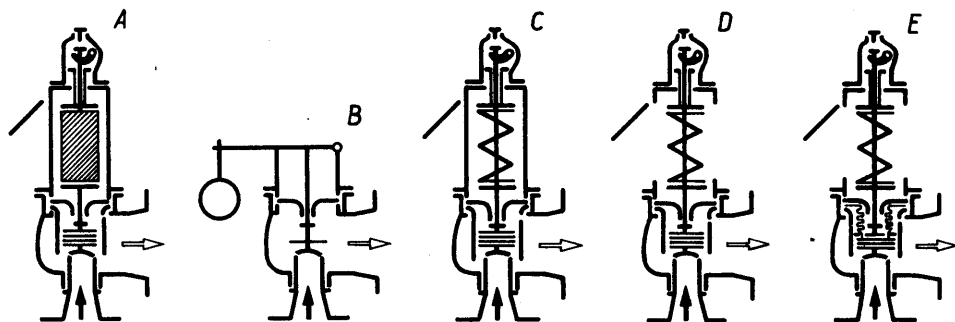


Bild 4.1 Schematische Darstellung verschiedener Sicherheitsventilkonstruktionen

Nach der **Hubhöhe** werden unterschieden:

- **Vollhubventile**
- **Hochhubventile**
- **Niederhubventile.**

Das Öffnen der Sicherheitsventile ist eine Funktion der Kräfte. Die Federkraft steigt mit dem Hub. Dem entgegen wirkt die statische und dynamische Öffnungskraft. Der letztgenannte Anteil kann durch konstruktiv hervorgerufene Strömungsumlenkungen stark beeinflusst werden. So entsteht beispielsweise durch eine über dem Abschlußkegel befindliche, im Durchmesser größere Glocke eine erhöhte Öffnungskraft, die wiederum einen größeren Hub zur Folge hat.

Je nach der Gestaltung dieser sogenannten **Hubhilfen** (Bild 4.2) und zusätzlicher konstruktiver **Hubbegrenzungen** ergibt sich eine für das Ventil charakteristische Hubhöhe.

Zahlreiche **Sonderbauarten** führen zu weiteren Unterteilungen. Da diese im Bereich der Heizungstechnik aber derzeit von untergeordneter Bedeutung sind, seien diese nur auszugsweise und stichpunktartig erwähnt:

#### • **Hilfsgesteuerte Sicherheitsventile mit Eigenmedium**

Ein Steuerventil spricht an und bewirkt mit dem Abblasestrom das Öffnen des Hauptventils. Je nach Bauart und Beaufschlagung des Hauptventils unterscheidet man zwischen Arbeits- und Ruhestromprinzip.

#### • **Hilfsgesteuerte Sicherheitsventile mit Zusatzbelastung**

Das Druckmedium wirkt öffnend auf den Kegel des Hauptventils (federbelastetes Sicherheitsventil). Auf die Ventilschraube drückt außer der Federkraft eine zusätzliche Kraft, z.B. ein mit Druckluft beaufschlagter Kolben. Nach Erreichen des Ansprechdruckes wird über ein Steuergerät die Zusatzbelastung abgebaut.

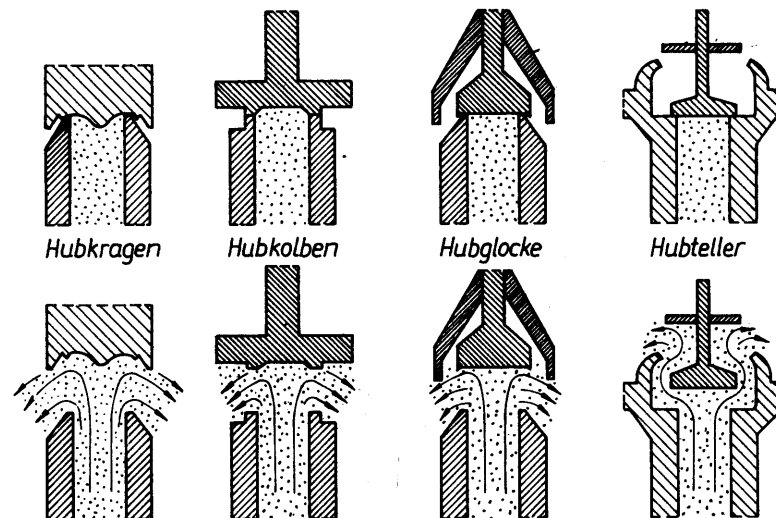


Bild 4.2 Konstruktionsvarianten für Hubhilfen mit Kennzeichnung der qualitativen Strömungsbilder im geöffneten Zustand

Die für die Bemessung entscheidende Einteilung der Sicherheitsventile wird nach der **Öffnungscharakteristik** getroffen. Sie sei deshalb detaillierter betrachtet. Bei den dabei definierten Überdrücken wird auf den Atmosphärendruck  $p_a$ , der auch am Ventilaustritt ansteht, bezogen.

#### 4.1.1. Proportional Sicherheitsventil

Im Bild 4.3 sind einige spezielle Ausführungen dieser Ventilart dargestellt. Steigt der Überdruck ( $p - p_a$ ) über den Ansprechüberdruck ( $p_A - p_a$ ) hinaus an, so ändert sich der Hub  $H$  des Kegels näherungsweise **proportional** zum Druckquotienten. Theoretisch ergibt sich die im Bild 4.4 dargestellte Gerade. Der Kennlinienverlauf realer Sicherheitsventile weicht mehr oder weniger von dieser ab.

In [20] ist festgelegt, daß die Kennlinie bei unverändertem Druck keine Hubänderungen (Sprünge) über 10 % des Gesamthubes enthalten darf. Weiterhin müssen die Sicherheitsventile nach dem Ansprechen innerhalb eines Druckanstieges von maximal 10 %, bezogen auf den Ansprechüberdruck, den für den abzuführenden Massestrom erforderlichen Hub erreichen.

Beim Schließen tritt eine Hysterese auf, so daß der Schließdruck unter dem Ansprechdruck liegt. Der praktisch zu erwartende Hubverlauf beim Schließvorgang ist punktiert im Bild 4.4 eingetragen.

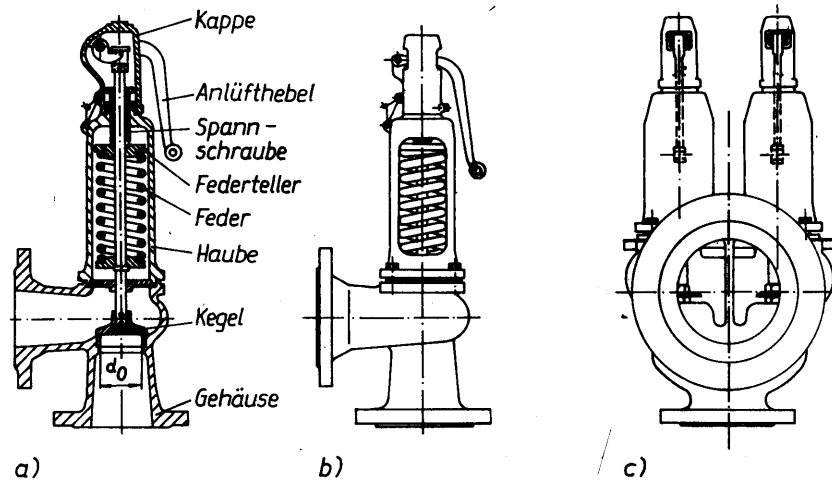


Bild 4.3 Proportional Sicherheitsventile (Fa. Gebr. LESER)

a) Schnittdarstellung; b) Ansicht (offene Haube);  
c) Doppel-Sicherheitsventil (geschlossene Haube)

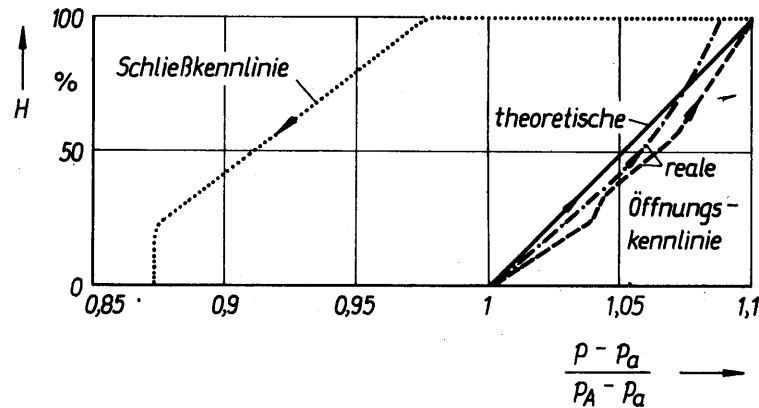


Bild 4.4 Charakteristische Öffnungs- und Schließkennlinien von Proportional-Sicherheitsventilen

Konstruktive Merkmale der Proportional Sicherheitsventile sind:

- Relativ geringer Hub
- Keine oder nur angedeutete Hubhilfen
- Ein- und Austrittsquerschnitte in der Regel gleich groß.

Die Proportional Sicherheitsventile werden bevorzugt für Flüssigkeitsabströmung eingesetzt, beispielsweise zur Absicherung der Lastfälle P, V, H1 bis H6 u.a.m.

Da das Ventil vordruckabhängig öffnet, ist bis zum maximalen Abblasestrom eine gute Lastanpassung auch bei wechselnden Teilbelastungen gegeben.

#### 4.1.2. Vollhub Sicherheitsventil

Bild 4.5 zeigt zwei spezielle Vollhub Sicherheitsventile. Steigt bei diesen Konstruktionen der Überdruck ( $p - p_a$ ) über den Ansprechüberdruck ( $p_A - p_a$ ) an, so steigt zunächst der Hub  $H$  des Kegels proportional zum Druckquotienten. Die Kennlinie verläuft dabei flacher als die der Proportional Sicherheitsventile. Im Bereich von  $(p - p_a) / (p_A - p_a) = 1,03 \dots 1,05$  wird die Hubhilfe voll wirksam, das Ventil **öffnet schlagartig** bis zur Hubbegrenzung und bleibt stabil geöffnet. Die realen Kennlinien entsprechen dabei weitestgehend dem beschriebenen theoretischen Verlauf, wie Bild 4.6 deutlich zeigt. Das Regelwerk /20/ schreibt vor, daß der Proportionalbereich nicht mehr als 20 % des Gesamthubes ausmachen darf und daß die schlagartige Öffnung innerhalb einer 5 %igen Drucksteigerung nach dem Ansprechen erfolgen muß.

Beim Schließen tritt wieder eine Hysterese auf, die zu einem unter dem Ansprechdruck liegenden Schließdruck führt. Eine Variante des Kurvenverlaufs ist im Bild 4.6 punktiert dargestellt.

Konstruktive Merkmale der Vollhub Sicherheitsventile sind:

- Großer Hub
- Vorhandene Hubhilfen
- Austrittsquerschnitt ist größer als der Eintrittsquerschnitt.

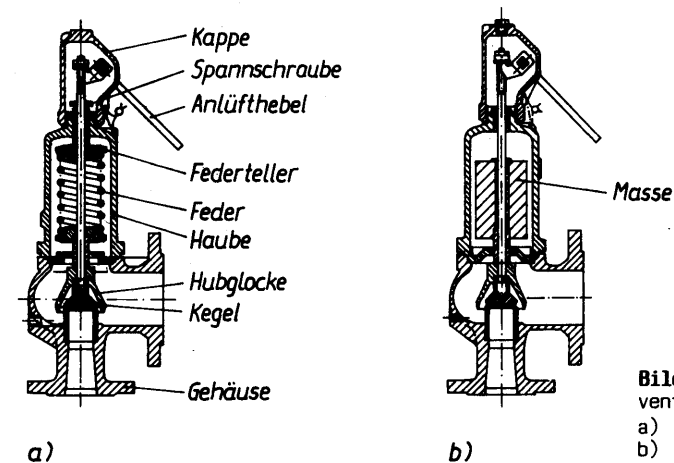
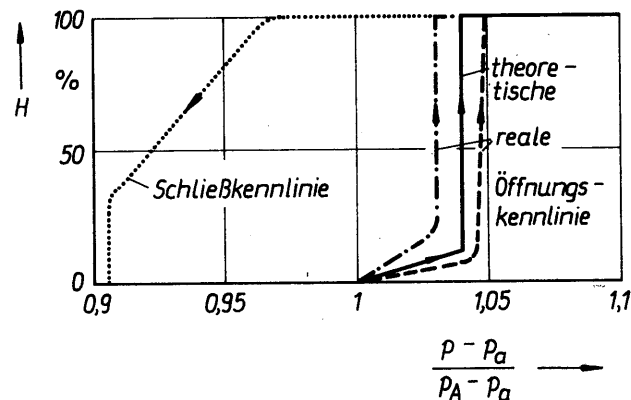


Bild 4.5 Vollhub Sicherheitsventil (Fa. BOPP & REUTHER)

a) Federbelastung  
b) Massebelastung



**Bild 4.6** Charakteristische Öffnungs- und Schließkennlinien von Vollhubventilen

Die Vollhubventile eignen sich besonders für das Abblasen von Gasen und Dämpfen, da bei einem relativ kleinen Öffnungsdruckbereich eine große Abblaseleistung erreicht wird. Der Volumenexpansion der kompressiblen Fluide bei Drucksenkung sind die Querschnittsverhältnisse des Vollhubventils angepaßt. Es eignet sich somit zur Absicherung der Lastfälle M, H7 bis H9 u.a.m.

Da das Ventil bei einem Druckgrenzwert plötzlich voll öffnet, ist eine gute Lastanpassung nicht erreichbar. Sind die Vollhubventile bezüglich der Abblaseleistung zu groß ausgewählt (falsche Lastannahme oder/und falscher Bemessungsalgorithmus), so können durch sich wiederholendes Öffnen und Schließen gefährliche Pulsationen in der Anlage auftreten.

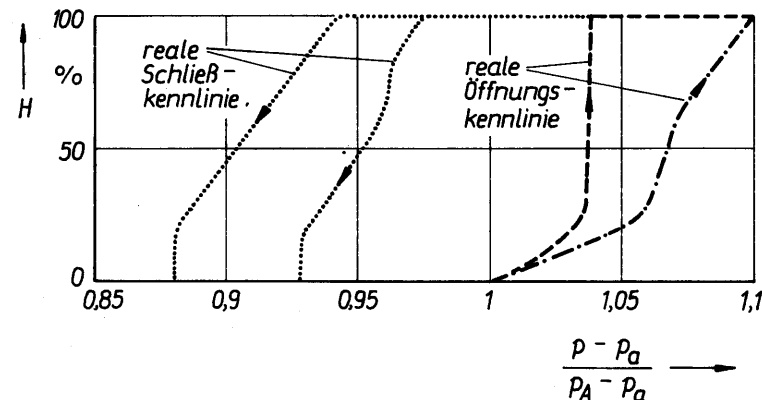
Zur Flüssigkeitsabströmung eignen sich die Vollhubventile nur bedingt, da einerseits durch die schlagartige Öffnung die Gefahr des Druckstoßes besteht sowie andererseits Fluide mit großer Dichte und hohen Ausflußgeschwindigkeiten zur Materialerosion – vornehmlich am Ventilsitz – führen können.

Problematisch sind weiterhin die Einsatzfälle bei Zuströmung eines Zweiphasengemischs (Wasser/Dampf) und bei Heißwasserableitung.

Als technischen Kompromiß schreiben die Ventilhersteller bzw. die technischen Aufsichtsbehörden für die genannten Einsatzfälle mitunter eine zusätzliche konstruktive Hubbegrenzung vor, die beispielsweise bei 50 % des vollen Hubes liegt.

### 4.1.3. Normalsicherheitsventil

Diese Ventilart wurde erst in den letzten Jahren definiert. Man ging dabei von der praktischen Erkenntnis aus, daß die an Proportional- und Vollhubventilen gestellten Kennlinien-Anforderungen für zahlreiche Einsatzfälle nicht notwendig sind.



**Bild 4.7** Charakteristische Öffnungs- und Schließkennlinien von Normalsicherheitsventilen

Es ist vorgegeben, daß diese Ventile nach dem Ansprechen innerhalb eines Druckanstieges von maximal 10 % den für den abzuführenden Massestrom erforderlichen Hub erreichen. Da bezüglich der Öffnungskennlinie keinerlei Anforderungen bestehen, sind die im Bild 4.7 dargestellten Verläufe möglich.

## 4.2. Bemessung

In diesem Abschnitt sind für eine determinierte Einsatzsituation folgende Aufgaben zu lösen:

- Bestimmen des Abblasestromes für ein bekanntes Sicherheitsventil
- Auswahl eines Sicherheitsventils aus einer Baureihe bei vorgegebenem Abblasestrom.

Zur Beantwortung der beiden Fragestellungen ist der Ausströmvorgang auf physikalisch-mathematischer Grundlage zu modellieren.

### 4.2.1. Definition der Berechnungsgrößen

Die in der Fachliteratur und den technischen Vorschriften verwendeten Bezeichnungen sind außerordentlich umfangreich, leider aber nicht einheitlich.

Nachfolgend werden nur die für die Bemessung relevanten Größen erfaßt.

Für die später durchzuführenden, praktischen Berechnungen ist es vorteilhaft, mit zugeschnittenen Größengleichungen zu arbeiten. In diesen Fällen müssen die tabellarisch angegebenen Einheiten verwendet werden. Die zugeschnittenen Größengleichungen sind an der jeweils nachgestellten Einheitenangabe zu erkennen (z.B. in  $\text{mm}^2$ , in  $\text{kg/s}$  usw.).

### Geometrische Größen

|       |               |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_0$ | $\text{mm}^2$ | Engster Strömungsquerschnitt<br>Er wird aus dem kleinsten Durchmesser vor oder hinter dem Ventilsitz $d_0$ errechnet. Evtl. vorhandene Einbauten werden nicht berücksichtigt. $A_0$ bildet die Grundlage für die Berechnung des Abblasestromes. |
| $d_0$ | mm            | Engster Strömungsdurchmesser                                                                                                                                                                                                                    |
| $A_E$ | $\text{mm}^2$ | Anschlußquerschnitt am Ventileintritt                                                                                                                                                                                                           |
| $d_E$ | mm            | Ventileintrittsdurchmesser.                                                                                                                                                                                                                     |

### Drücke

|                  |     |                                                                                                                                                        |
|------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_A$            | MPa | Ansprechdruck<br>Absoluter Druck vor dem Ventil, bei dem der Ventilkegel zu öffnen beginnt                                                             |
| $p_G$            | MPa | Gegendruck<br>Absoluter Druck am Ventilaustritt im Abblasezustand. Bei überkritischer Gasströmung handelt es sich um den Druck außerhalb des Strahles. |
| $p_a$            | MPa | Atmosphärendruck ( $p_a = 0,1 \text{ MPa}$ )                                                                                                           |
| $p_{\text{Öff}}$ | MPa | Öffnungsdruck<br>Absoluter Druck, bei dem das Ventil voll öffnet                                                                                       |
| $p_{\text{Sch}}$ | MPa | Schließdruck<br>Absoluter Druck, bei dem das Ventil nach dem Abblasevorgang wieder geschlossen hat                                                     |
| $p_1$            | MPa | Vordruck<br>Absoluter Druck im Druckraum vor dem Ventil während des Abblasens                                                                          |
| $p_2$            | MPa | Austrittsdruck<br>Absoluter Druck im ausfließenden Strahl am Ventilaustritt.                                                                           |

Die **Öffnungs-** und **Schließdrücke** werden von den Herstellern in der Regel als Öffnungs- und Schließdruckdifferenzen - bezogen auf den Ansprechdruck - angegeben. In /17/ sind nachfolgende Höchstwerte festgelegt:

- Die Differenz zwischen dem Überdruck, bei dem die volle Abblasemenge durchgesetzt wird, und dem Ansprechüberdruck darf folgende Werte nicht überschreiten:
  - 15 % für Überdrücke bis 0,25 MPa
  - 5 % für Überdrücke über 4 MPa bei Vollhubventilen und hilfsge-  
steuerten Sicherheitsventilen
  - 10 % für alle übrigen Drücke und Ventilarten.
- Die Differenz zwischen dem Ansprechüberdruck und dem Überdruck, bei dem das Ventil wieder dicht schließt, darf folgende Werte nicht überschreiten:
  - 5 % bei hilfsgesteuerten Sicherheitsventilen
  - 15 % bei Normalsicherheitsventilen
  - 10 % bei allen übrigen Ventilarten
  - 20 % bei allen Sicherheitsventilen für Flüssigkeiten.

Für die rechnerische Darstellung ist es einfacher, die Gln. (2.7) und (2.8)

$$p_{\text{Öff}}^* = \omega p_A$$

$$p_{\text{Sch}}^* = \sigma p_A$$

zu verwenden. Setzt man die umbewerteten Prozentwerte (z.B. 10 %) für  $\omega$  und  $\sigma$  (z.B.  $\omega = 1,10$ ;  $\sigma = 0,90$  usw.) ein und rechnet mit den Absolutdrücken, so liegt man bezüglich des erforderlichen Arbeitsbereiches stets auf der "sicheren" Seite:

$$1. \left. \begin{aligned} p_{\text{Öff}}^* - p_a &= \omega (p_A - p_a) \\ p_{\text{Öff}} &= \omega p_A \end{aligned} \right\} p_{\text{Öff}} = p_{\text{Öff}}^* - p_a (1 - \omega)$$

$$\text{Für } \omega = 1,1 \text{ ergibt sich } p_{\text{Öff}} = p_{\text{Öff}}^* + 0,01 \text{ MPa.}$$

$$2. \left. \begin{aligned} p_{\text{Sch}}^* - p_a &= \sigma (p_A - p_a) \\ p_{\text{Sch}} &= \sigma p_A \end{aligned} \right\} p_{\text{Sch}} = p_{\text{Sch}}^* - p_a (1 - \sigma)$$

$$\text{Für } \sigma = 0,9 \text{ ergibt sich } p_{\text{Sch}} = p_{\text{Sch}}^* - 0,01 \text{ MPa.}$$

Die Kleinheit des Fehlers und die zusätzlich gegebene Sicherheit bezüglich des Sicherheitsventil-Arbeitsbereiches dürfte die vereinfachte Anwendung der **Öffnungs-** und **Schließdruckkoeffizienten** ( $\omega$ ;  $\sigma$ ) stets rechtfertigen.

Beim Abblasen des vollgeöffneten Ventils entspricht der **Vordruck**  $p_1$  dem **Öffnungsdruck**  $p_{\text{Öff}}^*$ .

Der Austrittsdruck  $p_2$  ist bei Flüssigkeitsströmungen sowie bei unterkritischen bzw. kritischen Gasströmungen identisch mit dem Gegendruck  $p_G$ .

Somit wäre zur Bestimmung eines Flüssigkeits-Abblasestromes  $\dot{m}$  die Druckdifferenz  $\Delta p = p_{\text{öff}} - p_G$  maßgebend. Da jedoch der Ansprechdruck  $p_A$  eine von den technischen Kontrollorganen am Einsatzort überprüfbare und einstellbare Größe darstellt, während der Öffnungsdruck lediglich im Rahmen der Typprüfung kontrolliert wird, ist sicherheits- halber auf  $p_A$  Bezug zu nehmen.

### Beachte!

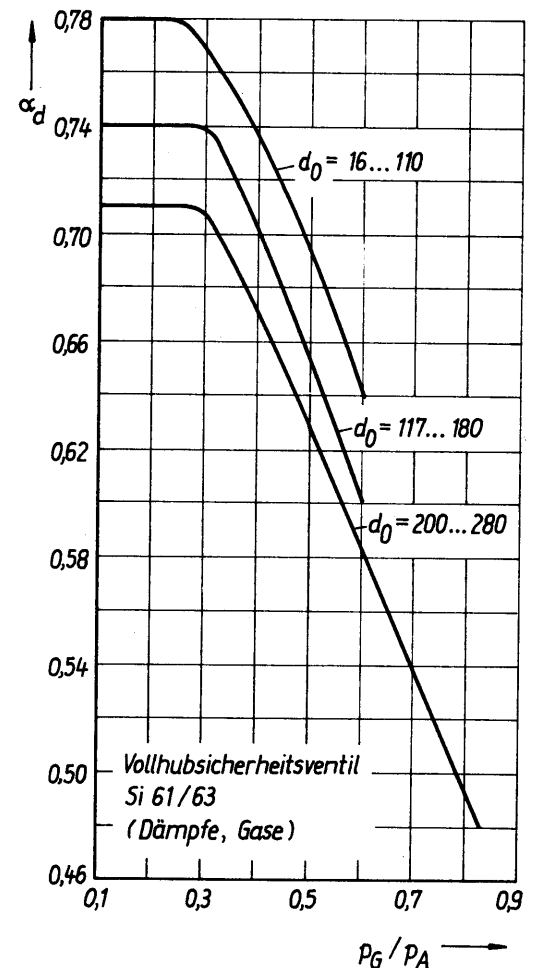
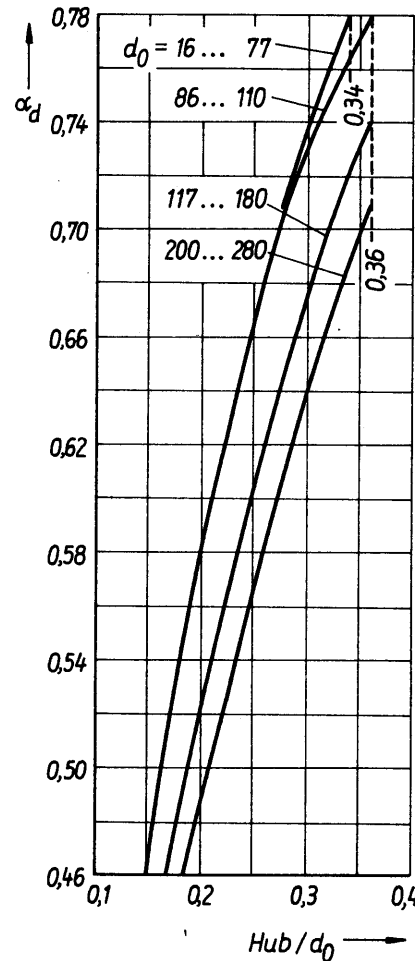
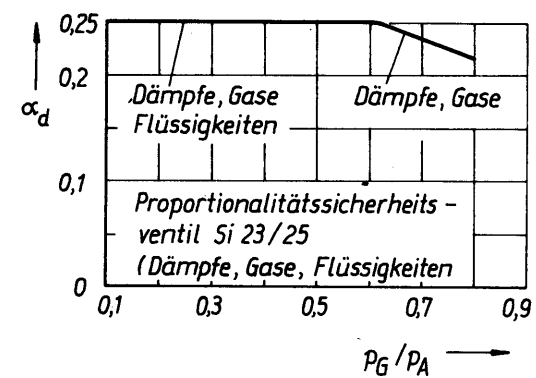
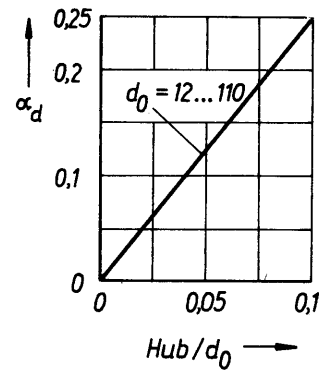
- Für die Bemessung der Sicherheitsventile wird der Vordruck gleich dem Ansprechdruck gesetzt ( $p_1 = p_A$ ). Weiterhin besteht bei Flüssigkeitsabströmung Gleichheit zwischen dem Austrittsdruck und dem Gegendruck  $p_2 = p_G$ . Bei Abblasen von Gasen und Dämpfen gelten im
  - unterkritischen und kritischen Bereich  $p_2 = p_G$
  - überkritischen Bereich  $p_2 > p_G$ .
- Arbeitsdruckdifferenzen sind im Algorithmus zur Festlegung der Ansprechdrücke parallel zu den Schließdruckdifferenzen zu beachten (vgl. Abschnitt 3.1.3.). Beide Größen sind für den ordnungsgemäßen Anlagenbetrieb und die funktionsge- rechte Arbeitsweise des Sicherheitsventils von großer Bedeutung.

### Strömungstechnische Ventilcharakteristik

|            |   |                                                              |
|------------|---|--------------------------------------------------------------|
| $\alpha$   | - | Ausflußziffer                                                |
| $\alpha_d$ | - | Zuerkannte Ausflußziffer                                     |
|            |   | Vom technischen Überwachungsorgan zugelassene Ausflußziffer; |
|            |   | in der Regel gilt $\alpha_d = 0,9\alpha$ .                   |

Die Größe der Ausflußziffern ist grundsätzlich eine Funktion der Konstruktion (Ge- häuseform, Sitzquerschnitt, Kegelform, Kegelführung, Hubbegrenzung). Besonders bei Gasen und Dämpfen besteht auch noch eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Gegendruck; d.h., die Ausflußziffer ist keine reine konstruktionsbezogene Ventilkenn- größe. Der Hersteller der Sicherheitsventile muß deshalb den gegendruckabhängigen Verlauf für die Ausflußziffer angeben, mindestens jedoch den maximal zulässigen Ge- gendruck zu einer gegebenen Ausflußziffer benennen.

Im Bild 4.8 sind für ein praktisches Ventilsortiment die Einflüsse auf die Ausfluß- ziffer dargestellt.



**Bild 4.8** Ausflußziffern in Abhängigkeit des Hubes und des Gegendruckes spezieller Sicherheitsventiltypen (Fa. BOPP & REUTHER)

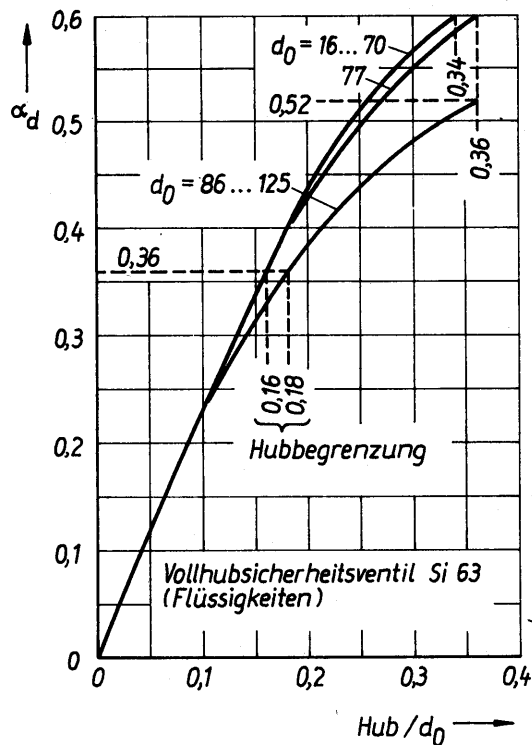


Bild 4.8(2)

#### Weitere strömungstechnische und thermodynamische Größen

|                 |                       |                                                                |
|-----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|
| $\dot{m}$       | kg/s                  | Massestrom                                                     |
| $w$             | m/s                   | Geschwindigkeit                                                |
| $\rho$          | kg/m <sup>3</sup>     | Dichte                                                         |
| $v$             | m <sup>3</sup> /kg    | Spezifisches Volumen                                           |
| $T$             | K                     | Absolute Temperatur ( $T = t + 273$ K)                         |
| $\kappa$        | -                     | Isentropenexponent (s. Tabelle 4.1)                            |
| $\psi$          | -                     | Ausflußfunktion                                                |
| $\psi_{\max}$   | -                     | Maximale Ausflußfunktion                                       |
| $\tilde{M}$     | kg/kmol               | Molare Masse (Molmasse)                                        |
| $\tilde{R}$     | J/(kmol K)            | Molare (allgemeine) Gaskonstante $\tilde{R} = 8314$ J/(kmol K) |
| $R$             | J/(kg K)              | Technische (individuelle) Gaskonstante                         |
| $x$             | -                     | Druckmittelbeiwert                                             |
| $x_{\text{WD}}$ | -                     | Dampfgehalt                                                    |
| $\mu$           | kg/(m <sup>2</sup> s) | Massestromdichte                                               |
| $h$             | kJ/kg                 | Spezifische Enthalpie                                          |
| $\Delta h_v$    | kJ/kg                 | Spezifische Verdampfungsenthalpie (Verdampfungswärme).         |

#### 4.2.2. Abblasen von Flüssigkeiten

Die Modellierung des Abblasevorganges kann aufbauend auf zwei reale Fälle erfolgen:

I. Das Sicherheitsventil ist unmittelbar an einem Behälter montiert. Das Abspeisen erfolgt gegen den Atmosphärendruck ins Freie. Das Ventil mit dem engsten Querschnitt

$A_0$  wird als kurzer Zylinderstutzen nachgebildet. Die BERNOULLI-Gleichung

$$p_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2 + \rho g z_2 \quad (4.1)$$

liefert bei Vernachlässigung der Höhenunterschiede ( $z_1 = z_2$ ) und für  $w_1 = 0$  die theoretische Austrittsgeschwindigkeit

$$w_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}. \quad (4.2)$$

Der ebenfalls theoretische Massedurchsatz berechnet sich dann zu

$$\dot{m}_{\text{th}} = A_0 w_2 \rho = A_0 \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)}. \quad (4.3)$$

Infolge Reibung wird die Geschwindigkeit verringert und durch die Strahleinschnürung die Durchflußfläche verkleinert. Mit Einführen der Ausflußziffer  $\alpha$  findet dies Beachtung, so daß der reale Massestrom

$$\dot{m} = \alpha A_0 \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)} \quad (4.4)$$

lautet.

II. Das Sicherheitsventil ist in einem Leitungssystem zwischen zwei Druckräumen X und Y eingebaut. Die BERNOULLI-Gleichung mit Reibungsglied (vgl. /8, S. 28/) beschreibt die Druckumsetzung:

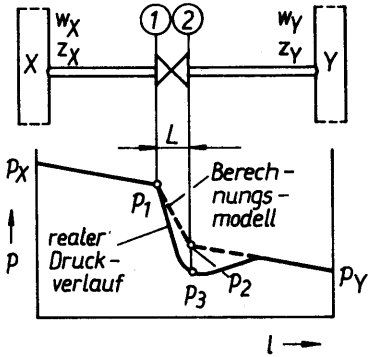
$$p_X + \rho g z_X + \frac{\rho}{2} w_X^2 = p_Y + \rho g z_Y + \frac{\rho}{2} w_Y^2 + \Delta p_{V,X-Y}. \quad (4.5)$$

Vereinfacht wurde dabei ein konstantes Geschwindigkeitsprofil über den Querschnitt (Kolbenströmung) angenommen. Setzt man weiterhin die Höhen und Geschwindigkeiten gleich ( $z_X = z_Y$ ;  $w_X = w_Y$ ), so folgt die triviale Aussage

$$\Delta p_{V,X-Y} = p_X - p_Y. \quad (4.6)$$

Der Druckverlust beim Durchströmen der Strecke X, Y entspricht somit der Differenz der statischen Drücke. Der Druckabfall wird durch Rohrreibung und den Einzelwider-

stand - Sicherheitsventil - hervorgerufen, wobei in der dem Ventil nachgeschalteten Rohrleitung ein sogenannter Druckrückgewinn auftritt. Das heißt, das Sicherheits-



ventil verursacht somit effektiv nur den Druckabfall

$$\Delta p_{V,1-2} = p_1 - p_2. \quad (4.7)$$

Der Druckverlust durch Einzelwiderstände kann verschiedenartig beschrieben werden (/8, S. 60/). Bei Sicherheitsventilen verwendet man üblicherweise die Darstellung mit dem Durchflußbeiwert ( $\equiv$  Ausflußziffer)  $\alpha$  und dem Öffnungsverhältnis  $m = A_0/A$ . Dabei entspricht  $A_0$  dem Drosselquerschnitt (engsten freien Querschnitt) und  $A$  dem lichten Rohrquerschnitt. Es gilt dann für den Druckverlust:

$$\Delta p_{V,1-2} = \frac{1}{(\alpha m)^2} \frac{\rho}{2} w^2 = \frac{1}{(\alpha m)^2} \frac{\dot{m}^2}{2 A^2 \rho}. \quad (4.8)$$

In Verbindung mit Gl. (4.7) ergibt sich der Abblasestrom zu

$$\dot{m} = \alpha m A \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)} = \alpha A_0 \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)}. \quad (4.9)$$

Die Gln. (4.4) und (4.9) sind im Aufbau identisch. Die Ausflußziffern können sich wegen der verschiedenartigen Strömungsbedingungen aber durchaus unterscheiden. Aus /1, S. 230 u.f./ folgt, daß es auch den entsprechenden Strömungsbedingungen angepaßte Prüfstände gibt.

Bei der Bemessung der Sicherheitsventile werden jedoch die Ausflußziffern üblicherweise nicht einbauabhängig differenziert.

Um Fertigungstoleranzen der Sicherheitsventile zu berücksichtigen, ist von der zu-erkannten Ausflußziffer  $\alpha_d$  auszugehen. Damit folgt

$$\dot{m} = \alpha_d A_0 \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)}. \quad (4.10)$$

Die zugeschnittenen Größengleichungen lauten damit:

$$\dot{m} = \frac{\alpha_d A_0}{707} \sqrt{\rho (p_1 - p_2)} \quad \text{in kg/s} \quad (4.11)$$

$$A_0 = \frac{707 \dot{m}}{\alpha_d \sqrt{\rho (p_1 - p_2)}} \quad \text{in mm}^2. \quad (4.12)$$

#### Anmerkung 1

Gl. (4.10) entspricht den Angaben im technischen Regelwerk /17/.

Nach /20/ ergibt sich mit  $\dot{m}^*$  in kg/h und  $\Delta p^*$  in bar:

$$A_0 = 0,6211 \frac{\dot{m}^*}{\alpha_d \sqrt{\rho \Delta p^*}} = 0,6211 \frac{3600 \dot{m}}{\alpha_d \sqrt{10} \sqrt{\rho \Delta p}} = \frac{707 \dot{m}}{\alpha_d \sqrt{\rho (p_1 - p_2)}} \quad \text{in mm}^2.$$

Es besteht vollständige Identität mit den Gln. (4.11) und (4.12).

#### Anmerkung 2

Selbstverständlich könnte die Bemessung der Sicherheitsventile auch analog der IEC 534-2-1 (Durchflußmengenermittlung für Stellventile /9, 10/) aufgebaut werden. Da letztlich aber ohnehin Messungen des realen Ausströmverhaltens erfolgen müssen, ist die Darstellungsart nicht entscheidend.

Aus den genannten Verfahren kann jedoch eine Umrechnung für nicht-turbulente Durchströmung des Sicherheitsventils entnommen werden. Dieser Fall dürfte bei Wasserabströmung zwar uninteressant sein; bei hoch-viskosen Fluiden sollte aber der Faktor  $F_R$  multiplikativ in Gl. (4.10) eingefügt werden.

#### Anmerkung 3

Um Erosionen bei der Ventildurchströmung vorzubeugen, wird mitunter die Geschwindigkeit im Eintrittsstutzen  $w_E$  begrenzt. Sie berechnet sich zu

$$w_E = \frac{10^6 \dot{m}}{\rho_1 A_E} = \frac{1,27 \cdot 10^6 \dot{m}}{\rho_1 d_E^2} \quad \text{in m/s}. \quad (4.13)$$

In /21/ wird  $w_{E,max} = 8 \text{ m/s}$  genannt.

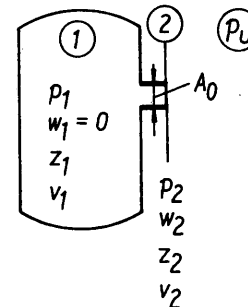
### 4.2.3. Abblasen von Gasen und Dämpfen

Das Ausströmen eines kompressiblen Mediums aus einem Behälter über einen kurzen Rohrstutzen dient als Grundlage für die theoretische Ableitung. Vereinfacht sei eine reibungsfreie, adiabate - also eine isentrope - Zustandsänderung angenommen. Die sogenannte BERNOULLI-Gleichung der Gasdynamik (/8, S. 32/) beschreibt diesen Vorgang

$$p_1 v_1^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0. \quad (4.14)$$

Die Vernachlässigung der Höhenglieder und das Beachten von  $w_1 = 0$  ergibt die theoretische Austrittsgeschwindigkeit

$$w_2 = \sqrt{\frac{2 \kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (4.15)$$



Damit läßt sich unter Einarbeitung des spezifischen Volumens am Austritt

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{1/\kappa} \quad (4.16)$$

und des Ausströmquerschnittes  $A_0$  der theoretische Massestrom bestimmen:

$$\dot{m}_{th} = A_0 \frac{w_2}{v_2} = A_0 \sqrt{2 \frac{p_1}{v_1}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (4.17)$$

Mit der Definition der **Ausflußfunktion**

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (4.18)$$

vereinfacht sich Gl. (4.17) zu

$$\dot{m}_{th} = A_0 \sqrt{2 \frac{p_1}{v_1}} \psi \quad (4.19)$$

Beachtet man nun die Geschwindigkeitsminderung infolge Reibung und die Verringerung der Durchströmfläche infolge Strahleinschnürung mit dem integralen Korrekturfaktor - Ausflußziffer -  $\alpha$ , so folgt für den realen Massestrom

$$\dot{m} = A_0 \alpha \sqrt{2 \frac{p_1}{v_1}} \psi \quad (4.20)$$

Unter Beachtung der zuerkannten Ausflußziffer  $\alpha_d$  gilt

$$\dot{m} = A_0 \alpha_d \sqrt{2 \frac{p_1}{v_1}} \psi \quad (4.21)$$

Nimmt bei konstant gehaltenem Behälterdruck  $p_1$  der Druck am Mündungsquerschnitt  $p_2$  ab, so wächst die Ausflußfunktion  $\psi$  kontinuierlich an. Beim **kritischen Druckverhältnis**

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{krit} = \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (4.22)$$

erreicht die Ausflußfunktion das Maximum

$$\psi_{max} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (4.23)$$

Da das Gas am Austritt dann selbst mit **Schallgeschwindigkeit** strömt, spricht man von der **kritischen Geschwindigkeit**

$$w_{2,max} = a = \sqrt{\kappa p_2 v_2} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} p_1 v_1} \quad (4.24)$$

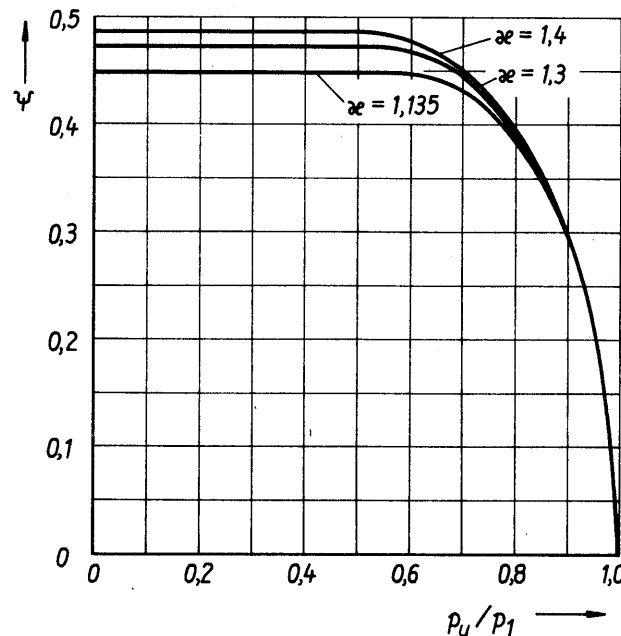
Bis zum kritischen Druck sind der Druck im Austrittsquerschnitt  $p_2$  und der Umgebungsdruck  $p_u$  identisch.

Wird der Umgebungsdruck weiter abgesenkt, so würde sich bei weiterhin geltender Druckgleichheit ( $p_2 = p_u$ ) das Verhältnis  $p_2/p_1$  verkleinern und Gl. (4.18) lieferte  $\psi < \psi_{max}$ . Dies wäre physikalisch aber nicht sinnvoll, denn ein größerer Potentialunterschied kann nicht zu einem kleineren Durchsatz führen. In Wirklichkeit bleiben  $\psi_{max}$  und das kritische Druckverhältnis erhalten.  $p_2$  liegt dann über dem Umgebungsdruck  $p_u$ . Der mit Schallgeschwindigkeit ausströmende Gasstrahl reißt außerhalb des engsten Querschnittes auf und entspannt sich irreversibel unter starker Geräuschentwicklung auf  $p_u$ .

Damit sind zwei Bereiche relevant:

- Unterkritisches Druckgefälle im Bereich  $(p_2/p_1)_{krit} < p_2/p_1 \leq 1$  mit Gültigkeit von  $\psi$  nach Gl. (4.18),
- Überkritisches und kritisches Druckgefälle im Bereich  $0 < p_u/p_1 \leq (p_2/p_1)_{krit}$  mit Gültigkeit von  $\psi_{max}$  nach Gl. (4.23).

Im Bild 4.9 ist der physikalisch sinnvolle Verlauf der Ausflußfunktion  $\psi$  aufgetragen.



**Bild 4.9** Ausflußfunktion  
Bei der realen Ventilbemessung ist anstelle des modellbezogenen Druckquotienten  $p_u/p_1$  das Druckverhältnis  $p_G/p_A$  zu verwenden.

Tabelle 4.1 enthält die wichtigsten Ausflußgrößen für die in der Heizungstechnik hauptsächlich verwendeten Stoffe.

**Tabelle 4.1** Stoffabhängige Ausflußgrößen: Isentropenexponent  $\kappa$ , kritisches Druckverhältnis  $(p_2/p_1)_{\text{krit}}$ , maximale Ausflußfunktion  $\psi_{\text{max}}$

| Stoff                        | $\kappa$ | $(p_2/p_1)_{\text{krit}}$ | $\psi_{\text{max}}$ |
|------------------------------|----------|---------------------------|---------------------|
| Luft, Stickstoff             | 1,4      | 0,528                     | 0,484               |
| Wasserdampf (näherungsweise) |          |                           |                     |
| - Sattedampf 1)              | 1,135    | 0,577                     | 0,449               |
| - Heißdampf 1)               | 1,3      | 0,546                     | 0,472               |

1) Spezielle Hinweise siehe Anmerkung 3, S. 201

Aus Gl. (4.21) folgen unter Beachten der vorgegebenen Einheiten die zugeschnittenen Größengleichungen:

$$\dot{m} = \frac{\alpha_d A_0}{707} \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \psi = \frac{\alpha_d A_0}{707} \sqrt{e_1 p_1} \psi \quad \text{in kg/s} \quad (4.25)$$

$$A_0 = \frac{707 \dot{m}}{\alpha_d \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \psi} = \frac{707 \dot{m}}{\alpha_d \sqrt{e_1 p_1} \psi} \quad \text{in mm}^2. \quad (4.26)$$

Die Dichten sind für spezielle Medien nach den Gln. (A2) bis (A5) des Anhangs zu berechnen oder entsprechenden Tafelwerken zu entnehmen.

Für Gase gilt allgemein mit dem Realgasfaktor  $Z$

$$e_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{p_1 \tilde{M}}{\tilde{R} T_1} \cdot \frac{1}{Z} \quad (4.27)$$

Die individuelle Gaskonstante für die üblicherweise verwendeten Gase lautet:

$$\left. \begin{array}{l} R_{\text{Luft}} = 287 \text{ J/(kg K)} \\ R_{\text{N}_2} = 297 \text{ J/(kg K)} \end{array} \right\} \text{Mittelwert: } R \approx 290 \text{ J/(kg K).}$$

Für Luft und Stickstoff kann im gängigen Einsatzbereich der Realgasfaktor unbeachtet bleiben ( $Z = 1$ ).

#### Anmerkung 1

In den bekannten technischen Regelwerken sind verschiedene Verfahren angegeben. Dabei wird als weitere charakteristische Größe der **Druckmittelbeiwert**  $x$  einbezogen. Es gelten nach /17/:

$$A_0 = \frac{\dot{m} x}{\alpha_d p_1} \quad (4.28)$$

Mit dem Druckmittelbeiwert für Dämpfe

$$x = \frac{1}{\psi} \sqrt{\frac{p_1}{2 e_1}} \quad (4.29)$$

bzw. für Gase

$$x = \frac{1}{\psi} \sqrt{\frac{\tilde{R} T_1}{2 \tilde{M}}} \quad (4.30)$$

ergibt sich wiederum Identität mit Gl. (4.21).

Gemäß /20/ gilt der nachfolgende Algorithmus mit  $\dot{m}^*$  in kg/h und  $p^*$  in bar:

#### Wasserdampf

$$A_0 = \frac{x \dot{m}^*}{\alpha_d p_1^*} \quad \text{in mm}^2 \quad (4.31)$$

$$x = \frac{0,6211}{\psi} \sqrt{p_1^* v_1} \quad (4.32)$$

Die Substitution von Gl. (4.32) in (4.31) führt zu

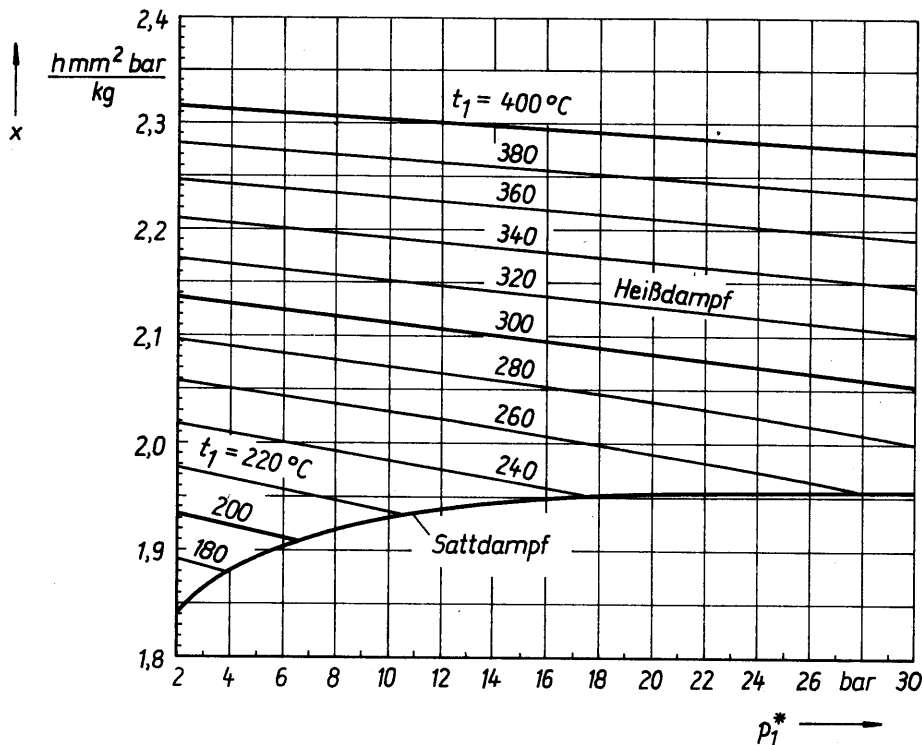
$$A_0 = \frac{0,6211 \dot{m}^*}{\alpha_d \psi \sqrt{\frac{p_1^*}{v_1}}} = \frac{0,6211 \cdot 3600 \dot{m}}{\alpha_d \psi \sqrt{\frac{10 p_1}{v_1}}} = \frac{707 \dot{m}}{\alpha_d \psi \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} \quad \text{in mm}^2.$$

#### Gase

$$A_0 = 0,1791 \frac{\dot{m}^*}{\alpha_d \psi p_1^*} \sqrt{\frac{T_1}{\tilde{M}}} \quad \text{in mm}^2 \quad (4.33)$$

Das Einsetzen von Gl. (4.27) liefert

$$A_0 = 0,1791 \frac{\dot{m}^*}{\alpha_d \psi p_1^*} \sqrt{\frac{p_1 10^6}{\tilde{R} e_1}} = \frac{0,1791}{\sqrt{8314}} \cdot \frac{3600 \dot{m} 10^3}{\alpha_d \psi 10 \sqrt{p_1 e_1}} = \frac{707 \dot{m}}{\alpha_d \psi \sqrt{e_1 p_1}} \quad \text{in mm}^2.$$



**Bild 4.10** Druckmittelbeiwert  $x$  für überkritische Wasserdampfströmung

Damit besteht völlige Übereinstimmung mit den Gl.n. (4.25) und (4.26).

Der Druckmittelbeiwert  $x$  gemäß der Gl. (4.32) kann für überkritische Wasserdampfströmung dem Bild 4.10 entnommen werden.

#### Anmerkung 2

Bei den Herstellerangaben zu den Ausflußziffern fällt auf, daß meist schon bei  $p_G/p_A > 0,2 \dots 0,3$  eine Reduzierung auftritt. Eine überkritische und damit gedrückungsabhängige Strömung wird aber eigentlich bis zu  $p_G/p_A \approx 0,5$  erwartet.

Aus heutiger Sicht erscheint das auf DE FILIPPIS und DRISKELL begründete sowie in IEC 534-2-2 fixierte Modell /11, 12/ zur Beschreibung der gasdynamischen Armaturendurchströmung geeigneter (vgl. auch Abschnitt 2.4.1.). Es müßten dann allerdings der  $K_V$ -Wert (Ventilkoeffizient) und der  $x_T$ -Wert (modifiziertes kritisches Differenzdruckverhältnis) gebildet werden.

#### Anmerkung 3

In Tabelle 4.1 sind die Ausflußgrößen der in der Heizungstechnik üblicherweise eingesetzten Medien zusammengestellt. Die Isentropenexponenten für Wasserdampf stellen nach /29/ gute Mittelwerte im üblichen Einsatzbereich dar. In der neueren Literatur /30, 31/ werden für den Naßdampfbereich keine Isentropenexponenten mehr genannt. Die isentrope Entspannung des Satttdampfes, die tief in das Naßdampfgebiet führt, stellt ohnehin nur eine Modellfiktion dar. Wird die Anpassung an die Realität durch die versuchstechnisch bestimmte Ausflußziffer  $\alpha$  für das gleiche Fluid vorgenommen, so wird ein fehlerhaftes  $\Psi(\alpha)$  kompensiert. Im Ergebnis erhielte man möglicherweise medienabhängige Ausflußziffern.

Das Problem besteht darin, daß wegen des großen apparatetechnischen Aufwandes nur spezielle Prüfmedien – beispielsweise Heißdampf oder Luft – eingesetzt werden und im weiteren eine Umrechnung erfolgt. Damit führt ein fehlerhafter Isentropenexponent natürlich auch zu einem falschen Ergebnis bezüglich Abblasestrom oder Abblasequerschnitt.

Die in Tabelle 4.1 angegeben, auf /29/ zurückgehenden Werte fanden bisher bei der Sicherheitsventil-Bemessung und -Nachrechnung Verwendung und bildeten auch die Grundlage für den im Bild 4.10 dargestellten Druckmittelbeiwert  $x$ . Da dieser in /17/ und /20/ weiterhin **festgeschrieben** ist, muß sich auch die numerische Rechnung auf die in Tabelle 4.1 fixierten Mittelwerte beziehen.

Unmittelbar an der Sättigungskurve ( $x_{WD} = 1$ ) existieren nach Tabelle 4.1 zwei verschiedene Isentropenexponenten,  $\alpha = 1,135$  für Satttdampf und  $\alpha = 1,3$  für Heißdampf. Der kleinere Wert bewirkt stets die ungünstigeren Ergebnisse für die Sicherheitsventil-Auslegung (kleinere Abblaseströme und größere Sitzquerschnitte). Im gültigen Diagramm für den Druckmittelbeiwert  $x$  (Bild 4.10) wird deshalb auch im Gebiet geringer Überhitzung der Wert für Satttdampf verwendet. Um bei der numerischen Berechnung adäquate Ergebnisse zu erhalten, sollten im Bereich geringer Überhitzung die Gl.n. (4.25) bzw. (4.26) mit den Parametern ( $p_1$ ;  $v_1$ ;  $\Psi$ ) sowohl für Satttdampf als auch Heißdampf ausgewertet und der kleinste vorhandene Abblasestrom  $\dot{m}$  bzw. der größte erforderliche Querschnitt  $A_0$  als Resultat ausgewiesen werden.

#### 4.2.4. Abblasen von Heißwasser

Bei der Entspannung von Heißwasser bildet sich bei der Unterschreitung des Siededruckes Dampf. In Abhängigkeit der Strömungsform, die wiederum von den Druckparametern und der Armaturengeometrie beeinflusst wird, kann Kavitation, Flashing und Critical flashing (vgl. Abschnitt 2.3.1.) auftreten. Für die Größe des Abblasestromes ist es maßgebend, an welcher Stelle die Dampf Bildung erfolgt. Diese Fragen sind derzeit noch weitestgehend ungeklärt. Vorhandene Annahmen und theoretische Modelle bedürfen noch der versuchstechnischen Überprüfung.

Im weiteren sollen zwei Berechnungsmethoden vorgestellt werden, wobei das Abblasen auf einen Druck, der weit unterhalb des kritischen Druckes liegt - beispielsweise auf Atmosphärendruck - angenommen wird.

### Getrenntes Phasenmodell

Der abzuführende Heißwasserstrom  $\dot{m}$  wird aufgeteilt in einen Dampf- und einen Wasserstrom. Grundlage bildet der Dampfgehalt  $x_{WD}$ , der bei adiabater Drosselung unter Vernachlässigung der Strömungsenergie entsteht:

$$x_{WD} = \frac{h_1 - h'_z}{\Delta h_{v,z}} \quad (4.34)$$

Es bedeuten:

- $h_1$  Enthalpie der Flüssigkeit bei Eintrittsdruck  $p_1$  ( $\approx$  Ansprechdruck) und Eintrittstemperatur  $t_1$   
 $h'_z$  Enthalpie der siedenden Flüssigkeit bei Entspannungsdruck  $p_z$   
 $\Delta h_{v,z}$  Spezifische Verdampfungsenthalpie bei Entspannungsdruck  $p_z$ .

Das konservativste Modell nimmt im Ventilsitz eine Entspannung auf den **Umgebungsdruck** an. Bei freiem Ausblas wäre dies aber der **Atmosphärendruck**  $p_z = p_a = 0,1$  MPa. Unter diesen Bedingungen gilt

$$x_{WD} = \frac{h_1 - 418}{2258} \quad (4.34a)$$

mit  $h_1$  in kJ/kg. Im Temperaturbereich  $115^\circ\text{C} < t < 200^\circ\text{C}$  kann Gl. (4.34a) auch

$$x_{WD} = -0,1853 + 1,877 \cdot 10^{-3} t - 0,398 \cdot 10^{-6} t^2 + 2,3054 \cdot 10^{-9} t^3 \quad (4.34b)$$

mit  $t$  in  $^\circ\text{C}$  geschrieben werden.

Ein verbessertes Modell geht von einer Entspannung auf den **kritischen Druck**  $p_z$  im engsten Strömungsquerschnitt aus. Zugehörig zu  $p_z$  sind  $h'_z$  und  $\Delta h_{v,z}$  zu bilden und Gl. (4.34) auszuwerten. Der kritische Druck berechnet sich fluidabhängig mit den in Tabelle 4.1 gegebenen Daten und dem zu  $t_1$  gehörigen Siededruck  $p_s$

$$p_z = (p_2/p_1)_{\text{krit}} p_s \quad (4.35)$$

Unabhängig vom gewählten Modell ergeben sich dann:

### Dampfstrom (Sattdampfzustand)

$$\dot{m}'' = x_{WD} \dot{m} \quad (4.36)$$

### Wasserstrom (Siedezustand)

$$\dot{m}' = \dot{m} - \dot{m}'' \quad (4.37)$$

Für beide Massestromanteile erfolgt eine getrennte Berechnung der erforderlichen Ventilquerschnitte  $A_0''$  nach Gl. (4.26) und  $A_0'$  nach Gl. (4.12).

Die jeweils einzusetzenden Ausflußziffern können dabei phasenabhängig sein.

Die Teilquerschnitte  $A_0''$  und  $A_0'$  sind zu einem Gesamtquerschnitt zu addieren. Bei Annahme einer Entspannung auf **Umgebungsdruck** (1. Modell) gilt

$$A_0 = A_0'' + A_0', \quad (4.38)$$

bei Entspannung auf den **kritischen Druck** (2. Modell) sollte

$$A_0 = 1,2 (A_0'' + A_0') \quad (4.38a)$$

gebildet werden.

Der 20 %ige Zuschlag berücksichtigt Abweichungen des realen Strömungsverlaufs vom Modell.

### Anmerkung

Da beim Durchströmen des Sitzquerschnittes nicht mit einer spontanen Verdampfung, sondern mit einem Siedeverzug zu rechnen ist, ergibt die vorgestellte Methode einerseits zu große Querschnitte. Andererseits kann der Siedeverzug aber bewirken, daß in einem anderen, hinter dem Ventilsitz liegenden Querschnitt der kritische Strömungszustand auftritt. Diese Durchströmfläche ist aber keine übliche Bemessungsgröße.

Die im Strömungskanal rechnerisch "vorverlegte" Verdampfung läßt auch die Frage offen, welche zugehörigen spezifischen Volumina bei der Querschnittsberechnung verwendet werden sollten. Üblicherweise setzt man die zur Eintrittstemperatur  $t_1$  gehörigen Volumina  $v'$  und  $v''$  - mitunter auch die Modifikation  $v'' p_s/p_1$  - ein.

Die genannten Unsicherheiten sind nur durch reale Ausströmversuche typabhängig zu klären.

Die dargestellte Berechnung wird in /17/ für Flüssigkeiten außer Heißwasser, deren Austrittstemperatur über der zum Atmosphärendruck gehörigen Siedetemperatur liegt, als Näherung empfohlen. Es sollten wegen der relativ unsicheren Lastermittlung Proportionalitätsventile für diesen Einsatzfall vorgesehen werden.

In /20/ fehlen entsprechende Festlegungen, da derzeit erst Versuche in Vorbereitung sind. Nach /21/ wird die vorgestellte Berechnung vorgeschlagen. Vollhubventile sind danach einsetzbar, wobei allerdings unterschiedliche Ausflußziffern für Flüssigkeiten und Dämpfe verwendet werden müssen.

Nach /27/ wird das beschriebene Modell zur Sicherheitsventilbemessung bei Beaufschlagung mit Flüssiggasen empfohlen.

### Einheitliches Phasenmodell

NESTKE und KEMNITZ erarbeiteten auf der Grundlage von /2, 28/ den für Heißwasser vorgeschlagenen Algorithmus. Zugehörig gelten die speziellen Definitionen:

|                                             |                       |                                                           |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------|
| $\mu$                                       | kg/(m <sup>2</sup> s) | Massestromdichte                                          |
| $\mu_d$                                     | kg/(m <sup>2</sup> s) | Kritische Massestromdichte nach GYARMATHY für Siedewasser |
| $p_S$                                       | MPa                   | Siededruck bei $t_1$                                      |
| $p_d$                                       | MPa                   | Kritischer Druck nach GYARMATHY                           |
| $t_1$                                       | °C                    | Heißwassertemperatur am Ventileintritt                    |
| $v'$                                        | m <sup>3</sup> /kg    | Spezifisches Volumen des Wassers bei $p_S$                |
| $\alpha_{dp}$                               | -                     | Zuerkannte Ausflußziffer bei teilweisem Phasenwandel      |
| $\alpha_{dp} = 0,89 \alpha_d = 0,8\alpha$ . |                       |                                                           |

Der Faktor 0,89 entspricht einem Mittelwert für den armaturenspezifischen Kennwert  $F_L$ , der für Stellventile nach IEC 534-2 als Druckrückgewinnfaktor bekannt ist. Bei Vorliegen von genauen Meßwerten sollten diese eingearbeitet werden.

Bei phasenabhängiger Ausflußziffer ist auf  $\alpha_{\text{Flüssigkeit}}$  zu beziehen!

Es gelten die zugeschnittenen Größengleichungen:

$$\dot{m} = 10^{-6} \alpha_{dp} A_0 \mu \quad \text{in kg/s} \quad (4.39)$$

$$A_0 = \frac{10^6 \dot{m}}{\alpha_{dp} \mu} \quad \text{in mm}^2 \quad (4.40)$$

### Einzusetzende Massestromdichte

$$1. \text{ Für } p_1 = p_S \text{ gilt } \mu = \mu_d. \quad (4.41)$$

$$2. \text{ Für } p_1 > p_S \text{ gilt,}$$

$$\begin{aligned} &\text{wenn } \mu_1 \leq \frac{\mu_d}{\alpha_{dp}}, \text{ dann } \mu = \mu_1 \\ &\text{sonst } \mu = \mu_2. \end{aligned} \quad (4.42)$$

### Berechnung der Massestromdichte

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{2}{v'} (p_1 - p_S) 10^6 + \mu_d^2} \quad \text{in kg/(m}^2 \text{ s)} \quad (4.43)$$

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{2}{v'} (p_1 - p_d) 10^6} \quad \text{in kg/(m}^2 \text{ s)} \quad (4.44)$$

$$\mu_d = 14500 p_S^{0,52} \quad \text{in kg/(m}^2 \text{ s)} \quad (4.45)$$

$$p_d = 0,752 p_S^{0,946} \quad \text{in MPa.} \quad (4.46)$$

### Anmerkung

Das Berechnungsmodell wird in /17/ für Wassertemperaturen  $t_1 > 115$  °C empfohlen. Für  $t_1 \leq 115$  °C gelten Gl. (4.11) und (4.12).

Die Gl. (4.45) und (4.46) sind im Bild 4.11 impliziert enthalten.

Als weiterführende Literatur sei empfohlen: /23, 24, 25/.

### 4.2.5. Abblasen von ungesättigtem Wasserdampf (Naßdampf)

Grundlage für diese Berechnungen bildet das im Abschnitt 4.2.4. vorgestellte "Einheitliche Phasenmodell", wobei auf die Originalarbeit /23/ zurückgegriffen wird. Die kritische Massestromdichte  $\mu_{d,x}$  ist dabei eine Funktion des Dampfdruckes  $p_S$ , der dem Abblasedruck  $p_1$  entspricht, und der Eintrittsenthalpie  $h_1$  des Naßdampfstromes. Der Zusammenhang ist im oberen Diagramm des Bildes 4.11 dargestellt.

Vorteilhaft bezüglich Handhabung und mathematischer Approximation erscheint der funktionelle Zusammenhang  $\mu_{d,x} = f(p_S, x_{WD})$ . Außer dem Abblasedruck  $p_S$  wird der Dampfgehalt  $x_{WD}$  als unabhängige Variable verwendet. Die Zuordnung erfolgt im unteren Diagramm des Bildes 4.11. Die Grenzfälle Sattdampf ( $x_{WD} = 1$ ) und Siedewasser ( $x_{WD} = 0$ ) sind eingeschlossen.

Näherungsweise gilt für die Massestromdichte die analytische Beziehung

$$\mu_{d,x} = C p_S^n \quad (4.47)$$

mit den vom Dampfgehalt  $x_{WD}$  abhängigen Exponenten

$$n = 0,98 - 0,46 \exp(-12,54 x_{WD} + 28,70 x_{WD}^2 - 28,86 x_{WD}^3) \quad (4.47a)$$

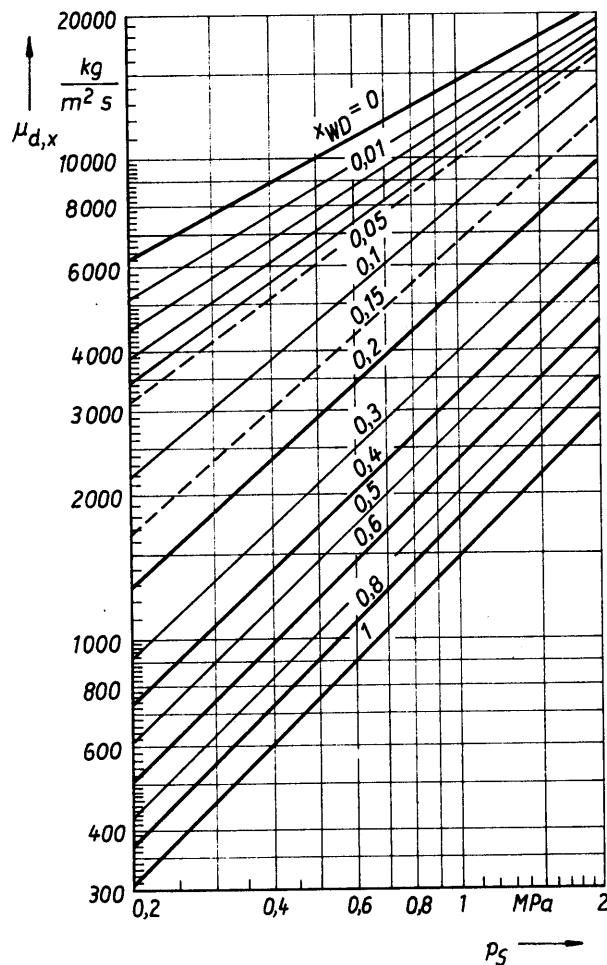
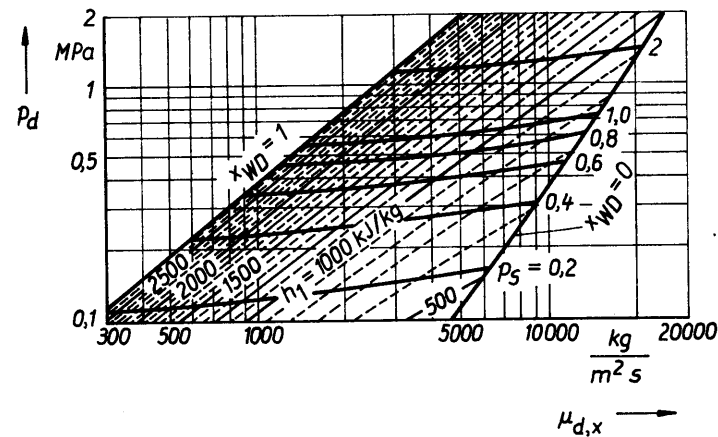
und Koeffizienten:

$$\text{für } x_{WD} \leq 0,3$$

$$C = \frac{14500}{1 + 11,772 x_{WD} - 76,009 x_{WD}^2 + 449,599 x_{WD}^3 - 766,049 x_{WD}^4} \quad (4.47b)$$

$$\text{für } x_{WD} \geq 0,3$$

$$C = \frac{1}{0,001377 x_{WD} - 0,002800 x_{WD}^2 + 0,003810 x_{WD}^3 - 0,001720 x_{WD}^4} \quad (4.47c)$$



**Bild 4.11** Kritische Massstromdichte ungesättigten Wasserdampfes in Abhängigkeit des Dampfgehaltes  $x_{WD}$  und des Sättigungsdruckes  $p_S$   
(Im Falle Heißwasserzuströmung -  $x_{WD}=0$  - ist  $p_S$  bezogen auf die Eintrittstemperatur  $t_1$  zu bilden!)

oben:  
Auszug aus /23/

$p_S$  Sättigungsdruck

$p_d$  Kritischer Druck im engsten Querschnitt

$h_1$  Eintrittsenthalpie

Mit den in den Abschnitten 4.2.1. und 4.2.4. definierten Größen ergibt sich der Massestrom

$$\dot{m} = \alpha_{dp} A_0 \mu_{d,x} \quad (4.48)$$

Als Ausflusziffer ist wiederum  $\alpha_{dp} = 0,89 \alpha_d = 0,8 \alpha$  zu verwenden. Besteht eine Phasenabhängigkeit der Ausflusziffer, so sollte ein gewichteter Mittelwert der Form  $\alpha = (1 - x_{WD}) \alpha_{\text{Flüssigkeit}} + x_{WD} \alpha_{\text{Dampf}}$  gebildet werden.

Die zugeschnittenen Größengleichungen lauten zusammenfassend:

$$\dot{m} = 10^{-6} \alpha_{dp} A_0 \mu_{d,x} \quad \text{in kg/s} \quad (4.49)$$

$$A_0 = \frac{10^6 \dot{m}}{\alpha_{dp} \mu_{d,x}} \quad \text{in mm}^2. \quad (4.50)$$

#### Anmerkung

In /17/ und /20/ sind derzeit noch keine Aussagen zur Berechnung von Naßdampfströmungen enthalten.

Nach /27/ wäre das im Abschnitt 4.2.4. vorgestellte "Getrennte Phasenmodell" mit Entspannung auf den kritischen Druck verwendbar.

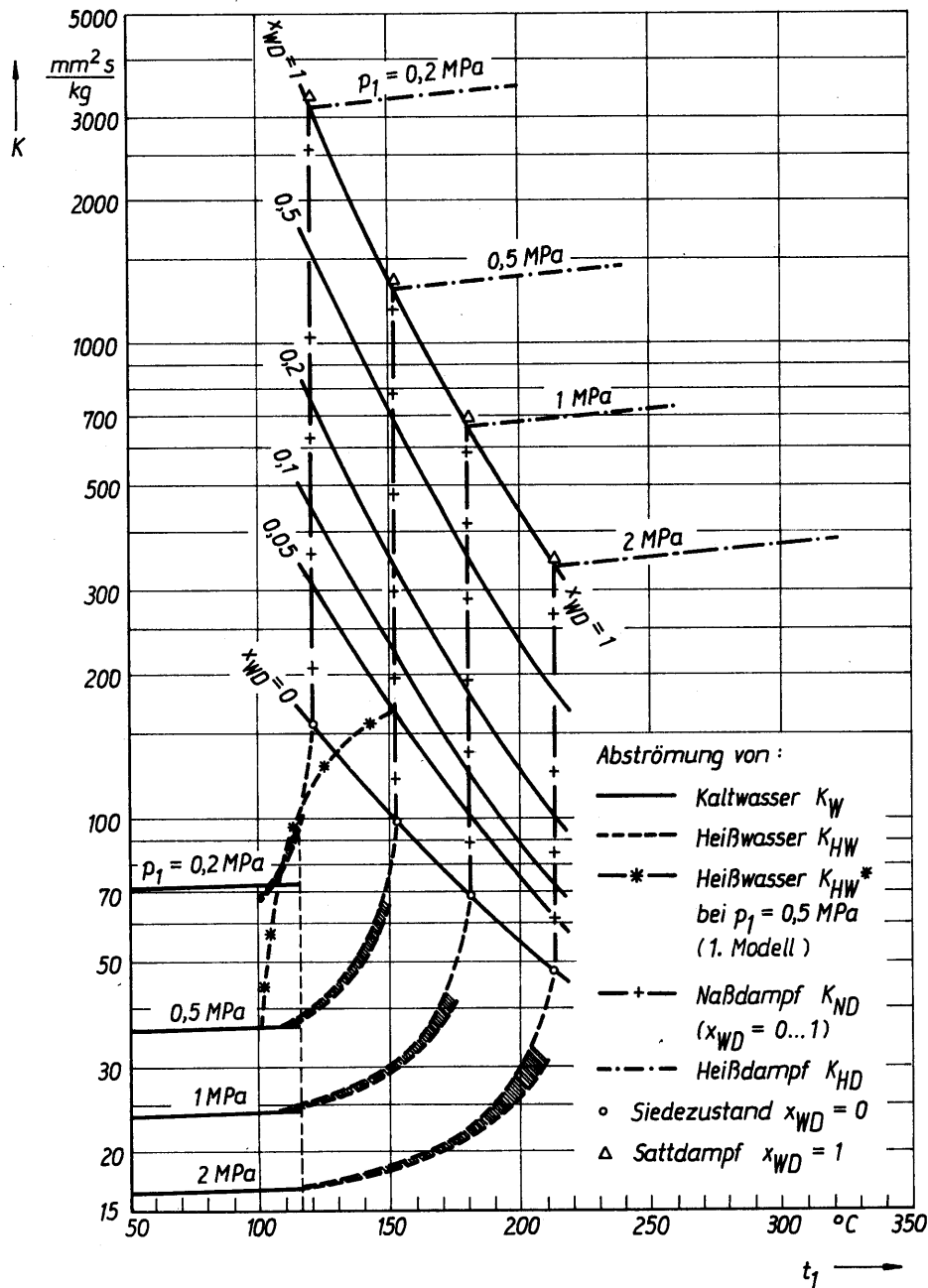
#### 4.2.6. Quantitativer Vergleich der Berechnungsmodelle für Wasser und Dampf

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Modelle tangieren teilweise. Diese Berührungsbereiche werden nachfolgend detailliert untersucht und die Ergebnisse im Bild 4.12 eingetragen. Als charakteristische Größe sei  $K = A_0 \alpha_d / \dot{m}$  bzw.  $K = A_0 \alpha_{dp} / \dot{m}$  verwendet. Der Gegendruck betrage stets  $p_a = 0,1$  MPa.

##### Wasser $\leq 115$ °C - Heißwasser - Naßdampf ( $x_{WD} = 0$ )

Für Kalt- und Warmwasser gilt nach Gl. (4.12)

$$K_W = \frac{A_0 \alpha_d}{\dot{m}} = \frac{707}{\sqrt{\rho(p_1 - p_2)}} \quad \text{in } \frac{\text{mm}^2 \text{ s}}{\text{kg}} \quad (*)$$



**Bild 4.12** Gegenüberstellung der spezifischen Abblasequerschnitte ( $K = A_0 \alpha / \dot{m}$ ) für Wasser und Wasserdampf in Abhängigkeit von den Druck- und Temperaturparametern bei atmosphärischem Gegendruck unter Verwendung verschiedener Berechnungsansätze

Für **Heißwasser** folgt gemäß Gl. (4.39)

$$K_{HW} = \frac{A_0 \alpha_{dp}}{\dot{m}} = \frac{10^6}{\mu} \quad \text{in } \frac{\text{mm}^2 \text{ s}}{\text{kg}} \quad (**)$$

mit  $\mu$  entsprechend den speziellen Verhältnissen nach Gl. (4.42) bis Gl. (4.45). Die Rechnung nach dem getrennten Phasenmodell ergibt

$$K_{HW}^* = \frac{A_0' \alpha_d}{\dot{m}} + \frac{A_0'' \alpha_d}{\dot{m}} = \frac{707 (1 - x_{WD})}{\sqrt{\varrho (p_1 - p_2)}} + \frac{707 x_{WD}}{\sqrt{\varrho_1 p_1} \psi_{\max}} \quad \text{in } \frac{\text{mm}^2 \text{ s}}{\text{kg}} \quad (***)$$

Für **Naßdampf** mit  $x_{WD} = 0$  liefert Gl. (4.50)

$$K_{ND} = \frac{A_0 \alpha_{dp}}{\dot{m}} = \frac{10^6}{\mu_{d,x=0}} = \frac{10^6}{\mu} \quad \text{in } \frac{\text{mm}^2 \text{ s}}{\text{kg}},$$

wobei Identität mit Gl. (\*\*) besteht.

Die im Bild 4.12 eingetragenen Ergebnisse zeigen:

- Der erforderliche Ventilquerschnitt wird bei Kalt- und Warmwasserabströmung - Gl. (\*) - nur gering von der Medientemperatur beeinflusst
- Bei Heißwasserabströmung nimmt der Ventilquerschnitt stark mit steigender Temperatur zu. Bei Rechnung nach dem "Einheitlichen Phasenmodell" - Gl. (\*\*) - wächst der Querschnitt in der Nähe des Siedepunktes progressiv. Im schraffierten Ergebnisbereich liegen die Einflüsse der realen Ausflussskizzen. Sie sind gegenüber der Grundtendenz unbedeutend.
- Die Ergebnisse nach dem "Getrennten Phasenmodell" - Gl. (\*\*\*) - erscheinen unlogisch, da der Querschnittsverlauf beim Übergang zur Kaltwasserabströmung eine starke Singularität aufweist und im Anfangsteil stark progressiv ist.
- Die in /17/ vorgegebene Temperaturgrenze von 115 °C bewirkt bei niedrigen Drücken große Abweichungen zwischen den Gln. (\*) und (\*\*). Bei  $p = 0,2 \text{ MPa}$  sind dies etwa 30 %.

#### Naßdampf ( $x_{WD} = 1$ ) - Sattdampf - Heißdampf

Für **Naßdampf** mit  $x_{WD} = 1$  ergibt Gl. (4.50)

$$K_{ND} = \frac{A_0 \alpha_{dp}}{\dot{m}} = \frac{10^6}{\mu_{d,x=1}} \quad \text{in } \frac{\text{mm}^2 \text{ s}}{\text{kg}} \quad (o)$$

Für **Sattdampf** und **Heißdampf** gilt Gl. (4.26)

$$K_{HD} = \frac{A_0 \alpha_d}{\dot{m}} = \frac{707}{\sqrt{\varrho_1 p_1} \psi_{\max}} \quad \text{in } \frac{\text{mm}^2 \text{ s}}{\text{kg}}, \quad (oo)$$

wobei  $\psi_{\max}$  in Abhängigkeit von  $\alpha$  nach Gl. (4.23) zu bestimmen ist.

Die Ergebnisse sind wiederum im Bild 4.12 eingetragen. Sie lassen sich wie folgt diskutieren:

- Die  $K_{ND}$ -Werte nach Gl. (o) befinden sich zwischen den  $K_{HD}$ -Werten nach Gl. (oo), wenn letztere für Sattedampf unter Annahme von  $\alpha = 1,135$  und für Heißdampf unter Annahme von  $\alpha = 1,3$  berechnet werden.
- Die  $K_{HD}$ -Werte für Heißdampf ( $\alpha = 1,3$ ) liegen an der Sättigungsgrenze um etwa 5 % unter den Sattedampfwerten. Sie steigen weiter mit zunehmender Überhitzungstemperatur an.

#### 4.2.7. Beispiele

##### Beispiel 1 (Kaltwasserabströmung)

Über ein Proportional Sicherheitsventil mit der Ausflußziffer  $\alpha_D = 0,25$  ist bei einem Ansprechdruck  $p_A = 0,65$  MPa ein Wasserstrom  $\dot{m}_W = 5,2$  kg/s mit einer Temperatur von 60 °C abzuführen. Der Abblasequerschnitt soll in Abhängigkeit des Gegendruckes  $p_G$  für zwei Fälle ermittelt werden.

Fall 1: Abströmen ins Freie  $p_G = p_a = 0,1$  MPa

Fall 2: Abströmen in einen geschlossenen Behälter  $p_G = 0,3$  MPa.

##### Lösung

Die Dichte beträgt  $\rho = 983$  kg/m<sup>3</sup>. Damit ergeben sich die erforderlichen Ventilquerschnitte nach Gl. (4.12):

##### Fall 1

$$A_0 = \frac{707 \cdot 5,2}{0,25 \cdot \sqrt{983 \cdot (0,65 - 0,1)}} \text{ mm}^2 = 632 \text{ mm}^2$$

##### Fall 2

$$A_0 = \frac{707 \cdot 5,2}{0,25 \cdot \sqrt{983 \cdot (0,65 - 0,3)}} \text{ mm}^2 = 793 \text{ mm}^2$$

##### Beispiel 2 (Gasabströmung)

Über ein an einem Druckluftkessel installiertes Vollhub Sicherheitsventil mit den im Bild 4.8 angegebenen Ausflußziffern ist im Ansprechfall ein Gasstrom  $\dot{m}_D = 0,15$  kg/s mit den Parametern  $p_A = 0,850$  MPa und  $\rho_D = 10$  kg/m<sup>3</sup> abzuführen.

Wie groß muß der engste Strömungsquerschnitt im Ventil mindestens sein, wenn das Ausblasen im Fall 1 ins Freie und im Fall 2 in ein System mit dem Gegendruck  $p_G = 0,5$  MPa erfolgt. Die Druckverluste in den sehr kurzen Rohrleitungen können vernachlässigt werden.

##### Lösung

##### Fall 1

Das Druckverhältnis

$$\frac{p_G}{p_A} = \frac{0,1}{0,850} = 0,12$$

zeigt, daß es sich um einen überkritischen Ausströmvorgang handelt. Damit gilt für die Ausflußfunktion der Maximalwert. Er ist Tabelle 4.1 mit  $\psi_{\max} = 0,484$  zu entnehmen.

Die zuerkannte Ausflußziffer beträgt für dieses Druckverhältnis bei Einsatz eines Vollhubventils mit einem Sitzdurchmesser  $d_0 = (16 \dots 110)$  mm nach Bild 4.8  $\alpha_D = 0,78$ .

Gemäß Gl. (4.26) folgt der Ausströmungsquerschnitt zu:

$$A_0 = \frac{707 \cdot 0,15}{0,78 \cdot \sqrt{10 \cdot 0,850 \cdot 0,484}} \text{ mm}^2 = 96,4 \text{ mm}^2$$

##### Fall 2

Für das Druckverhältnis

$$\frac{p_G}{p_A} = \frac{0,5}{0,850} = 0,588$$

ergibt sich mit  $\alpha = 1,4$  die Ausflußfunktion  $\psi$  nach Bild 4.9 oder Gl. (4.18) zu

$$\psi = \sqrt{\frac{1,4}{1,4 - 1} \cdot \left[ 0,588^{\frac{2}{1,4}} - 0,588^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} = 0,480$$

Aus Bild 4.8 folgt weiter für das gegebene Druckverhältnis bei Einsatz eines Vollhubventils mit dem Sitzdurchmesser  $d_0 = (16 \dots 110)$  mm die zuerkannte Ausflußziffer  $\alpha_D = 0,64$ .

Damit läßt sich Gl. (4.26) auswerten:

$$A_0 = \frac{707 \cdot 0,15}{0,64 \cdot \sqrt{10 \cdot 0,850 \cdot 0,480}} \text{ mm}^2 = 118,4 \text{ mm}^2$$

##### Beispiel 3 (Sattedampf abströmung)

In einem speziellen Havariefall ist ein Sattedampfstrom  $\dot{m}_{WD} = 2$  kg/s bei einem Ansprechdruck von  $p_A = 1,3$  MPa ohne zusätzlich wirkenden Gegendruck in die Atmosphäre abzuführen. Es soll ein Vollhubventil mit dem Prüfstandsergebnis  $\alpha = 0,656$  eingesetzt werden. Der erforderliche Sitzquerschnitt ist zu ermitteln.

Das spezifische Dampfvolumen beträgt  $v_1 \equiv v'' = 0,15112$  m<sup>3</sup>/kg.

Lösung

Wegen des überkritischen Druckgefälles folgt aus Tabelle 4.1 die Ausflußfunktion  $\psi_{\max} = 0,449$ .

Gemäß Abschnitt 4.2.1. ergibt sich aus der gemessenen Ausflußziffer  $\alpha$  die zuerkannte Ausflußziffer

$$\alpha_d = 0,9 \cdot 0,656 = 0,590.$$

Der erforderliche Sicherheitsventil-Querschnitt berechnet sich nach Gl. (4.26) zu

$$A_0 = \frac{707 \cdot 2 \cdot \sqrt{0,15112}}{0,590 \cdot \sqrt{1,3} \cdot 0,449} \text{ mm}^2 = 1820 \text{ mm}^2.$$

Beispiel 4 (Heißdampfabströmung)

Es ist ein Heißdampfstrom mit geringer Überhitzung ( $\dot{m}_{WD} = 2 \text{ kg/s}$ ;  $p_A = 1,3 \text{ MPa}$ ;  $t_1 = 210 \text{ °C}$ ) über ein Sicherheitsvollhubventil ( $\alpha_d = 0,590$ ) abzuleiten ( $p_G = 0,1 \text{ MPa}$ ). Welcher Sicherheitsventilquerschnitt wird benötigt?

Lösung

Gemäß Wasserdampf-tafel beträgt das spezifische Volumen

$$v_1 = 0,1597 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Die maximale Ausflußfunktion folgt gemäß Tabelle 4.1 zu  $\psi_{\max} = 0,472$ .

Damit liefert Gl. (4.26)

$$A_0 = \frac{707 \cdot 2 \cdot \sqrt{0,1597}}{0,590 \cdot \sqrt{1,3} \cdot 0,472} \text{ mm}^2 = 1780 \text{ mm}^2.$$

Nach Abschnitt 4.2.3., Anmerkung 3 ist in den technischen Vorschriften die Bemessung mit Hilfe des Druckmittelbeiwertes  $x$  vorgesehen. Danach ergibt das Abblasen von Satttdampf etwas größere Werte als gering überhitzter Heißdampf. Dies wird auch beim Vergleich der Beispiele 3 und 4 deutlich. Es ist der höhere Wert ( $A_0 = 1820 \text{ mm}^2$ ) zu verwenden.

Ergänzend sei eine Berechnung nach /20/ gemäß Gl. (4.31) durchgeführt. Es folgt für  $p_1^* = 13 \text{ bar}$  aus Bild 4.10 der Druckmittelbeiwert  $x = 1,94 \text{ h mm}^2 \text{ bar/kg}$ .

Damit liefert Gl. (4.31)

$$A_0 = \frac{1,94 \cdot 2 \cdot 3600}{0,590 \cdot 13} \text{ mm}^2 = 1821 \text{ mm}^2.$$

Beispiel 5 (Heißwasserabströmung)

Aus einem Heißwassersystem ist im Havariefall ein Massestrom  $\dot{m}_W = 7,3 \text{ kg/s}$  der Temperatur  $t_1 = 160 \text{ °C}$  bei einem Ansprechdruck  $p_A \equiv p_1 = 1,8 \text{ MPa}$  und atmosphärischem Gegendruck  $p_G = p_a = 0,1 \text{ MPa}$  abzuführen. Zum Einsatz kommt ein Proportional-sicherheitsventil mit der zuerkannten Ausflußziffer für übliche Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe  $\alpha_d = 0,25$ .

Der erforderliche Abblasequerschnitt ist vergleichsweise nach verschiedenen Berechnungsmethoden (Abschnitt 4.2.4.) zu ermitteln.

Lösung1. Berechnungsvariante "Einheitliches Phasenmodell"

Für die zuerkannte Ausflußziffer bei teilweisem Phasenwandel gilt  $\alpha_{dp} = 0,89$   $\alpha_d = 0,89 \cdot 0,25 = 0,22$ . Zur Eintrittstemperatur  $t_1 = 160 \text{ °C}$  gehört ein Siededruck von  $p_S = 0,618 \text{ MPa}$ . Mit diesem Wert folgen nach Gl. (4.45) die kritische Massestromdichte für Siedewasser

$$\mu_d = 14500 \cdot 0,618^{0,52} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}} = 11290 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$$

und nach Gl. (4.46) der kritische Druck im engsten Strömungsquerschnitt

$$p_d = 0,752 \cdot 0,618^{0,946} \text{ MPa} = 0,477 \text{ MPa}.$$

Mit dem spezifischen Volumen des Wassers  $v' = 0,0011022 \text{ m}^3/\text{kg}$  - gebildet für den zu  $p_S$  gehörigen Siedezustand - ergeben sich die speziellen Massestromdichten gemäß den Gln. (4.43) und (4.44):

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{2}{0,0011022} \cdot (1,8 - 0,618) \cdot 10^6 + 11290^2} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}} = 47668 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$$

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{2}{0,0011022} \cdot (1,8 - 0,477) \cdot 10^6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}} = 48996 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}).$$

Der nach Gl. (4.42) vorzunehmende Vergleich

$$\mu_1 \leq \frac{11290}{0,22} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}} = 51318 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$$

ist erfüllt, so daß  $\mu = \mu_1$  für die weitere Rechnung gilt.

Schließlich ergibt Gl. (4.40) den erforderlichen Ventilquerschnitt

$$A_0 = \frac{10^6 \cdot 7,3}{0,22 \cdot 47668} \text{ mm}^2 = 696 \text{ mm}^2.$$

## 2. Berechnungsvariante "Getrenntes Phasenmodell - Entspannung auf Atmosphärendruck"

Die Enthalpie am Eintritt des Sicherheitsventils beträgt  $h_1 = 676,2 \text{ kJ/kg}$ . Damit liefert Gl. (4.34a) den Dampfgehalt bei der Entspannung auf 0,1 MPa

$$x_{\text{WD}} = \frac{676,2 - 418}{2258} = 0,114.$$

Aus den Gl.n. (4.36) und (4.37) ergeben sich die Abblaseströme:

$$\dot{m}'' = 0,114 \cdot 7,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,832 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}' = (7,3 - 0,832) \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 6,468 \text{ kg/s}.$$

Die Querschnitte berechnen sich für die einzelnen Phasen getrennt. Es gelten nach Gl. (4.26) mit  $\psi_{\text{max}} = 0,449$  und  $v_{160^\circ\text{C}}'' = 0,30685 \text{ m}^3/\text{kg}$ :

$$A_0'' = \frac{707 \cdot 0,832 \cdot \sqrt{0,30685}}{0,25 \cdot \sqrt{1,8} \cdot 0,449} \text{ mm}^2 = 2164 \text{ mm}^2.$$

Weiterhin folgt nach Gl. (4.12) mit  $\varrho = 1/v'$  und  $v_{160^\circ\text{C}}' = 0,0011022 \text{ m}^3/\text{kg}$ :

$$A_0' = \frac{707 \cdot 6,468 \cdot \sqrt{0,0011022}}{0,25 \cdot \sqrt{1,8} - 0,1} \text{ mm}^2 = 466 \text{ mm}^2.$$

Die Gesamtquerschnittsfläche ist nach Gl. (4.38) zu bilden:

$$A_0 = (2164 + 466) \text{ mm}^2 = 2630 \text{ mm}^2.$$

## 3. Berechnungsvariante "Getrenntes Phasenmodell - Entspannung auf kritischen Druck"

Zur Eintrittstemperatur  $t_1 = 160^\circ\text{C}$  gehört der Siededruck  $p_g = 0,618 \text{ MPa}$ . Damit folgt der kritische Druck gemäß Gl. (4.35) mit  $(p_2/p_1)_{\text{krit}}$  für Sattedampf nach Tabelle 4.1:

$$p_z = 0,577 \cdot 0,618 \text{ MPa} = 0,36 \text{ MPa}.$$

Zugehörig zu diesem Entspannungsdruck, der modellgemäß im engsten Strömungsquerschnitt auftritt, betragen:

Enthalpie der siedenden Flüssigkeit

$$h_z' = 588,5 \text{ kJ/kg}$$

Verdampfungsenthalpie

$$\Delta h_{v,z} = 2145,3 \text{ kJ/kg}.$$

Mit der Enthalpie des eintretenden Heißwassers  $h_1 = 676,2 \text{ kJ/kg}$ , berechnet sich nach Gl. (4.34) der Dampfgehalt

$$x_{\text{WD}} = \frac{676,2 - 588,5}{2145,3} = 0,041.$$

Die Gl.n. (4.36) und (4.37) liefern damit die Masseströme der Einzelphasen:

$$\dot{m}'' = 0,041 \cdot 7,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,30 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}' = (7,3 - 0,30) \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 7,00 \text{ kg/s}.$$

Die für die Phasen getrennte Querschnittsberechnung verläuft völlig analog zur 2. Berechnungsvariante:

Gl. (4.26) mit  $\psi_{\text{max}} = 0,449$  und  $v_{160^\circ\text{C}}'' = 0,30685 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$A_0'' = \frac{707 \cdot 0,30 \cdot \sqrt{0,30685}}{0,25 \cdot \sqrt{1,8} \cdot 0,449} \text{ mm}^2 = 780 \text{ mm}^2$$

Gl. (4.12) mit  $v_{160^\circ\text{C}}' = 0,0011022 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$A_0' = \frac{707 \cdot 7,00 \cdot \sqrt{0,0011022}}{0,25 \cdot \sqrt{1,8} - 0,1} \text{ mm}^2 = 504 \text{ mm}^2.$$

Die Gesamtquerschnittsfläche ergibt sich gemäß Gl. (4.38a) zu

$$A_0 = 1,2 \cdot (780 + 504) \text{ mm}^2 = 1541 \text{ mm}^2.$$

## Fazit

Die konservativen Berechnungsmethoden nach dem "Getrennten Phasenmodell" ergeben sehr große Querschnitte. Durch das in /17/ empfohlene Verfahren "Einheitliches Phasenmodell" sind konstruktiv und wirtschaftlich vertretbare Lösungen erreichbar. Weitere experimentelle Untersuchungen erscheinen jedoch unerlässlich, um das Modell zu stützen oder zu vervollkommen.

## Beispiel 6 (Naßdampfabströmung)

Infolge eines Rohrbruchs in einem Wärmeübertrager, der mit den Primärparametern  $p_R = 1,7 \text{ MPa}$  und  $t_R = 190^\circ\text{C}$  betrieben wird, tritt ein Massestrom von  $\dot{m} = 5,94 \text{ kg/s}$  in den Mantelraum. Dieser ist mit einem Sicherheitsventil, das bei  $p_1 = 0,85 \text{ MPa}$  anspricht, verbunden.

Wie groß ist der Ventilquerschnitt zu wählen, wenn ein Proportional Sicherheitsventil mit einer zuerkannten Ausflußziffer  $\alpha_d = 0,25$  zum Einsatz kommt und der Abblasestrom ohne zusätzlichen Gegendruck ins Freie geführt wird?

Lösung

Die zuerkannte Ausflußziffer bei auftretendem Phasenwechsel berechnet sich zu

$$\alpha_{dp} = 0,89 \quad \alpha_d = 0,89 \cdot 0,25 = 0,22.$$

Um Gl. (4.50) auswerten zu können, ist die kritische Massestromdichte  $\mu_{d,x}$  zu ermitteln. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten.

I. Die Enthalpie des Primärwassers beträgt  $h_R = 807,7$  kJ/kg. Bei der Drosselentspannung auf den Druck im Mantelraum ändert sich diese praktisch nicht ( $h_1 = h_R$ ). Für diesen Wert und  $p_S = p_1 = 0,85$  MPa liefert das obere im Bild 4.11 dargestellte Diagramm:

$$\mu_{d,x} \approx 10000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}).$$

II. Die Entspannung des Heißwassers vom Rohrraumdruck auf Mantelraumdruck führt zu einer Teilverdampfung mit dem Dampfgehalt

$$x_{WD} = \frac{h_R - h'_1}{\Delta h_{v,1}} = \frac{807,7 - 732,0}{2038,7} = 0,037.$$

Mit diesem Parameter und dem bekannten  $p_S$  ergibt das untere im Bild 4.11 aufgezeichnete Diagramm:

$$\mu_{d,x} \approx 9600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}).$$

Der erforderliche Sicherheitsventil-Querschnitt beträgt gemäß Gl. (4.50)

$$A_0 = \frac{10^6 \cdot 5,94}{0,22 \cdot 9600} \text{ mm}^2 = 2813 \text{ mm}^2.$$

Würde die Berechnung nach dem im Abschnitt 4.2.5. - Anmerkung - erwähnten "Getrennten Phasenmodell" erfolgen, so ergäbe sich schrittweise:

$$\text{Gl. (4.35)}$$

$$p_Z = 0,577 \cdot 0,850 \text{ MPa} = 0,49 \text{ MPa}$$

$$\text{Gl. (4.34)}$$

$$x_{WD} = \frac{807,7 - 636,8}{2110,8} = 0,081$$

$$\text{Gln. (4.12) und (4.26) mit } v'_{0,85\text{MPa}} = 0,0011182 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ und } v''_{0,85 \text{ MPa}} = 0,22687 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$A'_0 + A''_0 = \frac{707 \cdot 5,94}{0,25} \cdot \left[ \frac{(1 - 0,081) \cdot \sqrt{0,0011182}}{\sqrt{0,85 - 0,1}} + \frac{0,081 \cdot \sqrt{0,22687}}{\sqrt{0,85} \cdot 0,449} \right] \text{ mm}^2$$

$$= 2162 \text{ mm}^2$$

$$\text{Gl. (4.38a)} \quad A_0 = 1,2 \cdot 2162 \text{ mm}^2 = 2594 \text{ mm}^2.$$

**4.3. Auswahlalgorithmus**

Üblicherweise wird die Ermittlung des Sicherheits-Ventilquerschnitts als Hauptaufgabe der Sicherheitsventilbemessung angesehen. Sind die Abblaseströme, Druckverhältnisse und Ventiltypen bekannt, so können die im Abschnitt 4.2. vorgestellten Berechnungsgleichungen ohne Schwierigkeiten automatisiert abgearbeitet werden. Die im Abschnitt 4.3.2. vorgestellten Unterprogramme

|        |                                                                  |
|--------|------------------------------------------------------------------|
| SVB-W  | Querschnittsermittlung bei Wasserabströmung ( $t_W \leq 115$ °C) |
| SVB-G  | Querschnittsermittlung bei Gas- oder Dampfabströmung             |
| SVB-HW | Querschnittsermittlung bei Heißwasserabströmung                  |
| SVB-ND | Querschnittsermittlung bei Naßdampfabströmung                    |

sind direkt als Kleinrechenprogramme verwendbar.

Bedeutend aufwendiger gestaltet sich in vielen Fällen die Auswahl des Lastfalles, der das größte Sicherheitsventil erfordert, und die Festlegung des endgültigen Ventiltyps.

Um diese Komplexaufgabe rationell zu lösen, wurde das Hauptprogramm **SVB** - Sicherheitsventilbemessung - entwickelt. Für eine sachgemäße Anwendung sind erforderlich:

1. Die Datei "Lastannahmen", in der für maximal  $i=21$  Lastfälle die Masseströme, Dichten und Temperaturen vermerkt sind (vgl. Bild 3.17), muß gefüllt sein.
2. Die Ansprechdrücke  $p_{A,1}$  und  $p_{A,2}$  sowie die Variantenkennung V (Datei "Behälter") müssen bekannt sein.
3. Die Datei "Sicherheitsventile" muß die relevanten Daten der für den Einsatz in Frage kommenden Sicherheitsventile enthalten.
4. Die ungünstigsten Gegendrucke  $p_{G,1}$  und  $p_{G,2}$  müssen vorliegen.

Während die beiden ersten Forderungen nach Ablauf des Hauptprogramms **LZO** - Lastzuordnung - erfüllt sind, muß zur Abarbeitung von **SVB** der Aufbau der Datei "Sicherheitsventile" noch erfolgen. Die maximalen Gegendrucke sind gemäß Abschnitt 5. zu benennen und werden in die Datei "Behälter" übernommen.

Weiterhin erweist es sich als zweckmäßig, innerhalb des Hauptprogramms die Ergebnisse der Querschnittsbemessung in der Datei "Ventilquerschnitt" zu speichern. Diese Arbeitsdatei ist ebenfalls noch zu formieren.

### 4.3.1. Dateien und Hauptprogramm

#### Datei "Sicherheitsventile"

Vorgeschlagen wird nachfolgender Dateiaufbau.

| s | Typ[s] | AV[s] | $\alpha\pi[0,s]$ | $\alpha\pi[1,s]$ | ... | $\alpha\pi[10,s]$ | $\bar{\alpha}\pi[0,s]$ | $\bar{\alpha}\pi[1,s]$ | ... | $\bar{\alpha}\pi[10,s]$ |
|---|--------|-------|------------------|------------------|-----|-------------------|------------------------|------------------------|-----|-------------------------|
|   |        |       |                  |                  |     |                   |                        |                        |     |                         |

Es bedeuten:

|                         |                 |                                                                                                                                                             |
|-------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| s                       | -               | Laufende Nummer des Sicherheitsventils                                                                                                                      |
| Typ[s]                  | -               | Ventiltyp<br>P Proportional Sicherheitsventil<br>V Vollhub Sicherheitsventil<br>VH Vollhub Sicherheitsventil mit Hubbegrenzung<br>N Normalsicherheitsventil |
| AV[s]                   | mm <sup>2</sup> | Engster Ausströmungsquerschnitt des Sicherheitsventils<br>( $\equiv$ Herstellerangabe $A_0$ )                                                               |
| $\alpha\pi[0,s]$        | -               | Ausflußziffer des Ventils für Wasserabströmung bei $\pi = 0$                                                                                                |
| $\alpha\pi[1,s]$        | -               | Ausflußziffer des Ventils für Wasserabströmung bei $\pi = 0,1$                                                                                              |
| $\alpha\pi[2,s]$        | -               | Ausflußziffer des Ventils für Wasserabströmung bei $\pi = 0,2$                                                                                              |
| ...                     |                 |                                                                                                                                                             |
| $\alpha\pi[10,s]$       | -               | Ausflußziffer des Ventils für Wasserabströmung bei $\pi = 1$                                                                                                |
| $\bar{\alpha}\pi[0,s]$  | -               | Ausflußziffer des Ventils für Gas- bzw. Dampf abströmung<br>bei $\pi = 0$                                                                                   |
| $\bar{\alpha}\pi[1,s]$  | -               | Ausflußziffer des Ventils für Gas- bzw. Dampf abströmung<br>bei $\pi = 0,1$                                                                                 |
| $\bar{\alpha}\pi[2,s]$  | -               | Ausflußziffer des Ventils für Gas- bzw. Dampf abströmung<br>bei $\pi = 0,2$                                                                                 |
| ...                     |                 |                                                                                                                                                             |
| $\bar{\alpha}\pi[10,s]$ | -               | Ausflußziffer des Ventils für Gas- bzw. Dampf abströmung<br>bei $\pi = 1$                                                                                   |

Wie bei der Kommentierung der Ausflußziffer (Abschnitt 4.2.1.) bereits angedeutet, ist die Ausflußziffer vom Medium (Flüssigkeit oder Gas/Dampf) und vom Druckverhältnis  $\pi$  abhängig (vgl. auch Bild 4.8). Das **Druckverhältnis**

$$\pi = \frac{p_G}{p_A} \quad (4.51)$$

ist dabei als Quotient aus Gegendruck  $p_G$  und Ansprechdruck  $p_A$  definiert.

Es wird empfohlen, die gleichen Ventiltypen in Blöcken abzuspeichern, beispielsweise von  $s = 1$  bis  $s = 20$  alle Proportional Sicherheitsventile P, von  $s = 21$  bis  $s = 40$  alle Vollhub Sicherheitsventile V usw. Dies bietet bei der später vorzunehmenden Vorauswahl Vorteile. Dabei sollten auch Reserveplätze vorgesehen werden. Man erreicht dies bei Durchnummerierung von  $s$ , Eintragen des Ventiltyps P; V usw. sowie der Werte  $AV[s] = 0$ ;  $\alpha\pi[0,s] = 0$ ; ...;  $\bar{\alpha}\pi[10,s] = 0$ .

Sind die Ventile für bestimmte Medienströme - z.B. Vollhubventile ohne Hubbegrenzung für Wasserabströmung - nicht zugelassen, so werden die entsprechenden Ausflußziffern mit Null belegt ( $\alpha\pi[0,s] = 0$ ; ...;  $\alpha\pi[10,s] = 0$ ).

Gleiches gilt für die Druckverhältnisse  $\pi$ , die nach Herstellerangaben den Ventileinsatz nicht gestatten. So setzt man beispielsweise:  $\bar{\alpha}\pi[7,s] = 0$ ; ...;  $\bar{\alpha}\pi[10,s] = 0$ .

Für die im Bild 4.8 vorgestellten Sicherheitsventile kann die im Bild 4.13 gezeigte Datei erstellt werden.

| s  | Typ[s] | AV[s] | $\alpha\pi[ ]$<br>[0,s]...[10,s] |      | $\bar{\alpha}\pi[ ]$<br>[0,s]...[6,s] [7,s] [8,s] [9,s] [10,s] |      |      |      |   |   |
|----|--------|-------|----------------------------------|------|----------------------------------------------------------------|------|------|------|---|---|
| 1  | P      | 113   | 0,25                             | 0,25 | 0,25                                                           | 0,25 | 0,23 | 0,21 | 0 | 0 |
| 2  | P      | 201   |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 3  | P      | 314   |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 4  | P      | 491   |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 5  | P      | 804   |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 6  | P      | 1257  |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 7  | P      | 1964  |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 8  | P      | 3117  |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 9  | P      | 4657  |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 10 | P      | 6793  |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 11 | P      | 9503  | 0,25                             | 0,25 | 0,25                                                           | 0,25 | 0,23 | 0,21 |   |   |
| 12 | P      | 0     | 0                                | 0    | 0                                                              | 0    | 0    | 0    |   |   |
| 13 | P      |       |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 14 | P      |       |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 15 | P      |       |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 16 | P      |       |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 17 | P      |       |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 18 | P      |       |                                  |      |                                                                |      |      |      |   |   |
| 19 | P      | 0     | 0                                | 0    | 0                                                              | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 |

**Bild 4.13** Datei "Sicherheitsventile" für die im Bild 4.8 vorgestellten Ventilarten und -größen

| s  | Typ[s] | AV[s] | $\alpha\pi$ [ ] | $\overline{\alpha\pi}$ [ ] |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
|----|--------|-------|-----------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--|
|    |        |       | ... [10,s]      | ... [2,s]                  | [3,s] | [4,s] | [5,s] | [6,s] | [7,s] | [8,s] | [9,s] | [10,s] |  |
| 20 | V      | 201   | 0,60            | 0,78                       | 0,77  | 0,74  | 0,69  | 0,64  | 0     | 0     | 0     | 0      |  |
| 21 | V      | 314   |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 22 | V      | 491   |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 23 | V      | 615   |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 24 | V      | 804   |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 25 | V      | 1018  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 26 | V      | 1257  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 27 | V      | 1662  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 28 | V      | 1964  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 29 | V      | 2463  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 30 | V      | 3117  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 31 | V      | 3848  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 32 | V      | 4657  | 0,60            |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 33 | V      | 5809  | 0,52            |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 34 | V      | 6793  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 35 | V      | 7543  |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 36 | V      | 9503  |                 | 0,78                       | 0,77  | 0,74  | 0,69  | 0,64  |       |       |       |        |  |
| 37 | V      | 10750 |                 | 0,74                       | 0,74  | 0,70  | 0,65  | 0,60  |       |       |       |        |  |
| 38 | V      | 12270 | 0,52            |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 39 | V      | 15390 | 0               |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 40 | V      | 18870 |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 41 | V      | 22170 |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 42 | V      | 25450 |                 | 0,74                       | 0,74  | 0,70  | 0,65  | 0,60  | 0     | 0     |       |        |  |
| 43 | V      | 31420 |                 | 0,71                       | 0,71  | 0,67  | 0,63  | 0,58  | 0,54  | 0,49  |       |        |  |
| 44 | V      | 38010 |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 45 | V      | 43370 |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 46 | V      | 51070 |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 47 | V      | 61575 |                 | 0,71                       | 0,71  | 0,67  | 0,63  | 0,58  | 0,54  | 0,49  |       |        |  |
| 48 | V      | 0     |                 | 0                          | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |       |        |  |
| 49 | V      |       |                 |                            |       |       |       |       |       |       |       |        |  |
| 50 | V      | 0     | 0               | 0                          | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      |  |

Bild 4.13(2)

| s  | Typ[s] | AV [s] | $\alpha\pi$ [0,s] | ... $\alpha\pi$ [10,s] | $\overline{\alpha\pi}$ [0,s] | ... $\overline{\alpha\pi}$ [10,s] |
|----|--------|--------|-------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 51 | VH     | 201    | 0,36              | 0,36                   | 0                            | 0                                 |
| 52 | VH     | 314    |                   |                        |                              |                                   |
| 53 | VH     | 491    |                   |                        |                              |                                   |
| 54 | VH     | 615    |                   |                        |                              |                                   |
| 55 | VH     | 804    |                   |                        |                              |                                   |
| 56 | VH     | 1018   |                   |                        |                              |                                   |
| 57 | VH     | 1257   |                   |                        |                              |                                   |
| 58 | VH     | 1662   |                   |                        |                              |                                   |
| 59 | VH     | 1964   |                   |                        |                              |                                   |
| 60 | VH     | 2463   |                   |                        |                              |                                   |
| 61 | VH     | 3117   |                   |                        |                              |                                   |
| 62 | VH     | 3848   |                   |                        |                              |                                   |
| 63 | VH     | 4657   |                   |                        |                              |                                   |
| 64 | VH     | 5809   |                   |                        |                              |                                   |
| 65 | VH     | 6793   |                   |                        |                              |                                   |
| 66 | VH     | 7543   |                   |                        |                              |                                   |
| 67 | VH     | 9503   |                   |                        |                              |                                   |
| 68 | VH     | 10750  |                   |                        |                              |                                   |
| 69 | VH     | 12270  | 0,36              | 0,36                   |                              |                                   |
| 70 | VH     | 0      | 0                 | 0                      |                              |                                   |
| 71 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 72 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 73 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 74 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 75 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 76 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 77 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 78 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 79 | VH     |        |                   |                        |                              |                                   |
| 80 | VH     | 0      | 0                 | 0                      | 0                            | 0                                 |

Bild 4.13(3)

Datei "Ventilquerschnitt"

Es wird der Dateiaufbau

| i | A $\alpha$ W1 [i] | $\mu$ 1 [i] | $\mu$ 11 [i] | $\mu$ 21 [i] | A $\alpha$ WD1 [i] | A $\alpha$ ND1 [i] | A $\alpha$ D1 [i] |
|---|-------------------|-------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|   |                   |             |              |              |                    |                    |                   |
| i | A $\alpha$ W2 [i] | $\mu$ 2 [i] | $\mu$ 12 [i] | $\mu$ 22 [i] | A $\alpha$ D2 [i]  |                    |                   |
|   |                   |             |              |              |                    |                    |                   |

gewählt, wobei die Zeilennummer i mit der in der Datei "Lastannahmen" verwendeten Laufnummer i identisch ist. Es bedeuten:

| i                  |                       | Laufende Nummer des Lastfalls                                                                                        |
|--------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A $\alpha$ W1 [i]  | mm <sup>2</sup>       | Erforderlicher modifizierter Querschnitt bei Wasserabströmung über SV1                                               |
| $\mu$ 1 [i]        | kg/(m <sup>2</sup> s) | Massestromdichten bei Heißwasserabströmung über SV1<br>(Bei Naßdampfabströmung wird xWD auf $\mu$ 1[i] gespeichert!) |
| $\mu$ 11 [i]       | kg/(m <sup>2</sup> s) |                                                                                                                      |
| $\mu$ 21 [i]       | kg/(m <sup>2</sup> s) |                                                                                                                      |
| A $\alpha$ WD1 [i] | mm <sup>2</sup>       | Erforderlicher modifizierter Querschnitt bei Wasserdampfabströmung über SV1                                          |
| A $\alpha$ ND1 [i] | mm <sup>2</sup>       | Erforderlicher modifizierter Querschnitt bei Naßdampfabströmung über SV1                                             |
| A $\alpha$ D1 [i]  | mm <sup>2</sup>       | Erforderlicher modifizierter Querschnitt bei Druckmedienabströmung über SV1                                          |
| A $\alpha$ W2 [i]  | mm <sup>2</sup>       | Erforderlicher modifizierter Querschnitt bei Wasserabströmung über SV2                                               |
| $\mu$ 2 [i]        | kg/(m <sup>2</sup> s) | Massestromdichten bei Heißwasserabströmung über SV2                                                                  |
| $\mu$ 12 [i]       | kg/(m <sup>2</sup> s) |                                                                                                                      |
| $\mu$ 22 [i]       | kg/(m <sup>2</sup> s) |                                                                                                                      |
| A $\alpha$ D2 [i]  | mm <sup>2</sup>       | Erforderlicher modifizierter Querschnitt bei Druckmedienabströmung über SV2                                          |

Unter A $\alpha$  wird das Produkt von Querschnittsfläche A<sub>0</sub> und Ausflußziffer  $\alpha$  verstanden. Das Abspeichern der verschiedenen Massestromdichten bei Heißwasserabströmung ist erforderlich, da die in Rechnung zu stellende Größe von der Ausflußziffer abhängt und somit A $\alpha$  erst bei der Größenauswahl iterativ bestimmt werden kann.

Außerdem wird bei Naßdampfabströmung der Dampfgehalt xWD auf  $\mu$ 1 gespeichert. Damit ist später eine gemittelte Ausflußziffer bestimmbar.

Hauptprogramm

Im Bild 4.14 ist der Datenflußplan [SVB] - Sicherheitsventilbemessung - dargestellt. Er gliedert sich in drei Hauptabschnitte.

I. Korrektur und Ergänzung der Datei "Lastannahmen"

Die mit dem Hauptprogramm [LZO] ermittelte Datei (Abschnitt 3.3.2.) wurde ausgedruckt. Nach kritischer Überprüfung können sich evtl. Änderungen erforderlich machen. Es ist auch möglich, daß das Gesamtsicherungskonzept eine Veränderung erfährt. In dessen Folge könnten Lastfälle entfallen oder Ergänzungen notwendig werden. Diesen möglichen Forderungen wird im ersten Programmabschnitt entsprochen.

Es bestehen die Möglichkeiten:

- Löschen des Lastfalls i  
Alle Dateidaten auf Zeile i werden Null gesetzt.

- Ergänzen des Lastfalls i  
Zunächst werden wiederum alle Dateidaten der Zeile i Null gesetzt. Es folgt die Eingabe des Lastfalles LF[i]. Dabei können alle bisher verwendeten Bezeichnungen (Zusammenstellung im Abschnitt 3.3.1.) einschließlich des zusätzlichen Lastfalles "Z" benutzt werden. Prinzipiell sind aber auch weitere alphanumerische Bezeichnungen, die aus maximal drei Zeichen bestehen, einsetzbar. Sie wären individuell zu definieren.

Bei einer manuellen Ergänzung (HG=1) der Datei "Lastannahmen" gelten die nachfolgenden Eingabewerte.

|                  |                   |                        |   |             |                                            |
|------------------|-------------------|------------------------|---|-------------|--------------------------------------------|
| $\dot{m}W1 [i]$  | kg/s              | Abblasestrom           | } | Wasser      | Belastung des<br>Sicherheitsventils<br>SV1 |
| $qW1 [i]$        | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                 |   |             |                                            |
| $\dot{m}WD1 [i]$ | kg/s              | Abblasestrom           | } | Wasserdampf |                                            |
| $qWD1 [i]$       | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                 |   |             |                                            |
| $\dot{m}D1 [i]$  | kg/s              | Abblasestrom           | } | Druckmedium |                                            |
| $qD1 [i]$        | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                 |   |             |                                            |
| $\dot{m}W2 [i]$  | kg/s              | Abblasestrom           | } | Wasser      | Belastung des<br>Sicherheitsventils<br>SV2 |
| $qW2 [i]$        | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                 |   |             |                                            |
| $\dot{m}D2 [i]$  | kg/s              | Abblasestrom           | } | Druckmedium |                                            |
| $qD2 [i]$        | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                 |   |             |                                            |
| $tW [i]$         | °C                | Wassertemperatur       |   |             |                                            |
| $tWD [i]$        | °C                | Wasserdampftemperatur  |   |             |                                            |
| $tD [i]$         | °C                | Druckmedientemperatur  |   |             |                                            |
| $D [i]$          | -                 | Art des Druckmediums   |   |             |                                            |
|                  |                   | 1 Luft oder Stickstoff |   |             |                                            |
|                  |                   | 2 Satttdampf           |   |             |                                            |
|                  |                   | 3 Heißdampf            |   |             |                                            |

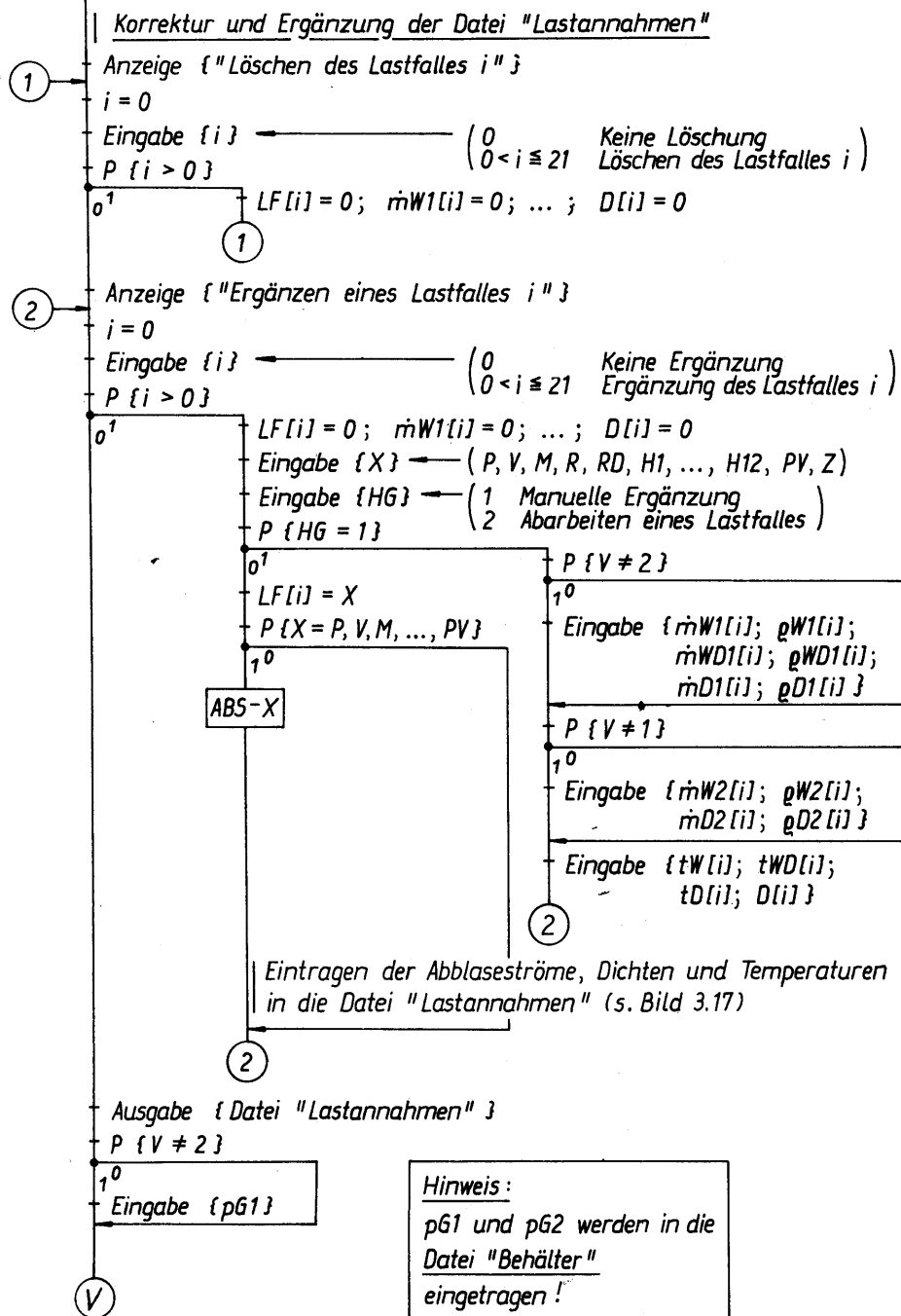


Bild 4.14 Flußplan des Hauptprogramms **SVB** (Sicherheitsventilbemessung) bestehend aus: "Korrektur und Ergänzung der Datei Lastannahmen"; "Querschnittsermittlung der Sicherheitsventile"; "Auswahl der Sicherheitsventile"

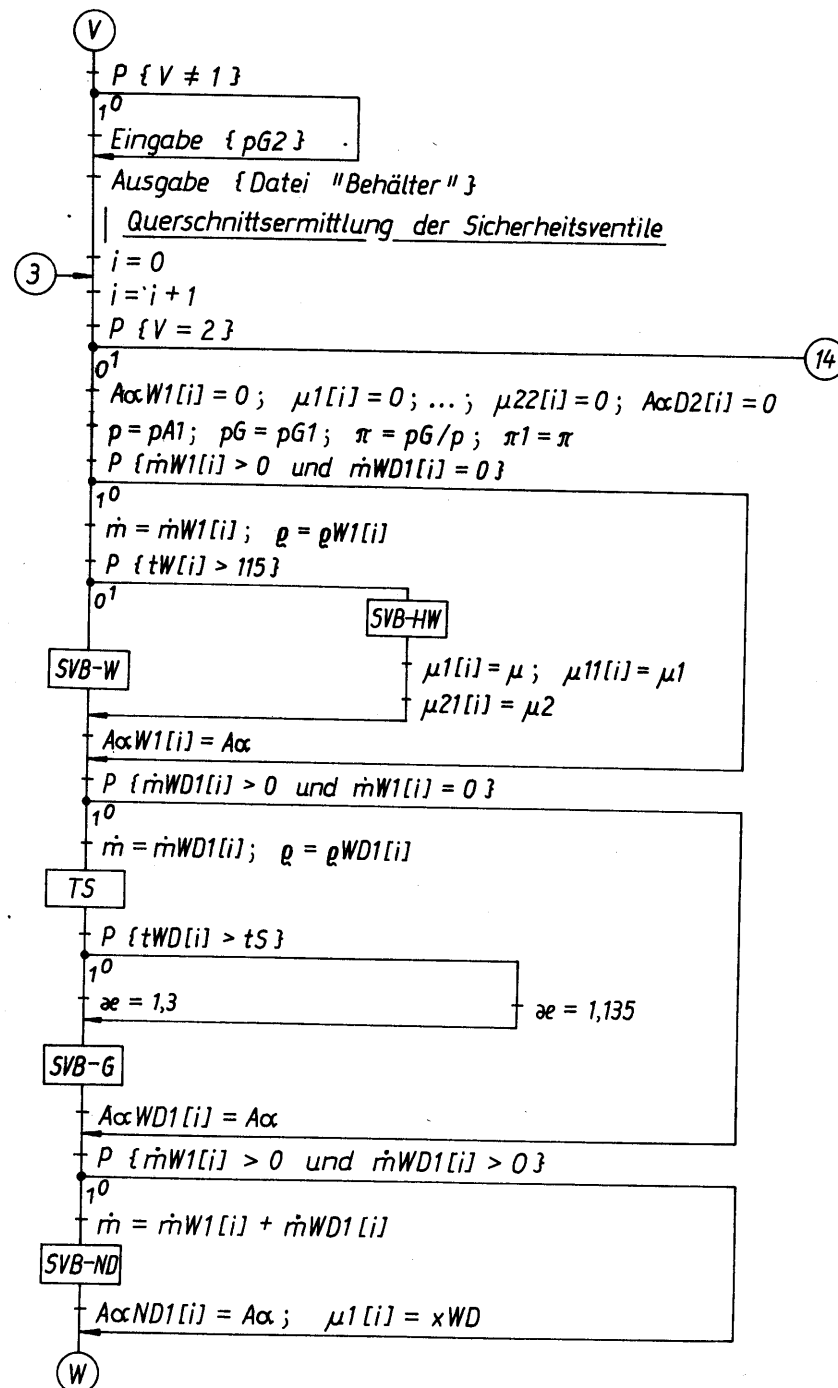


Bild 4.14(2)

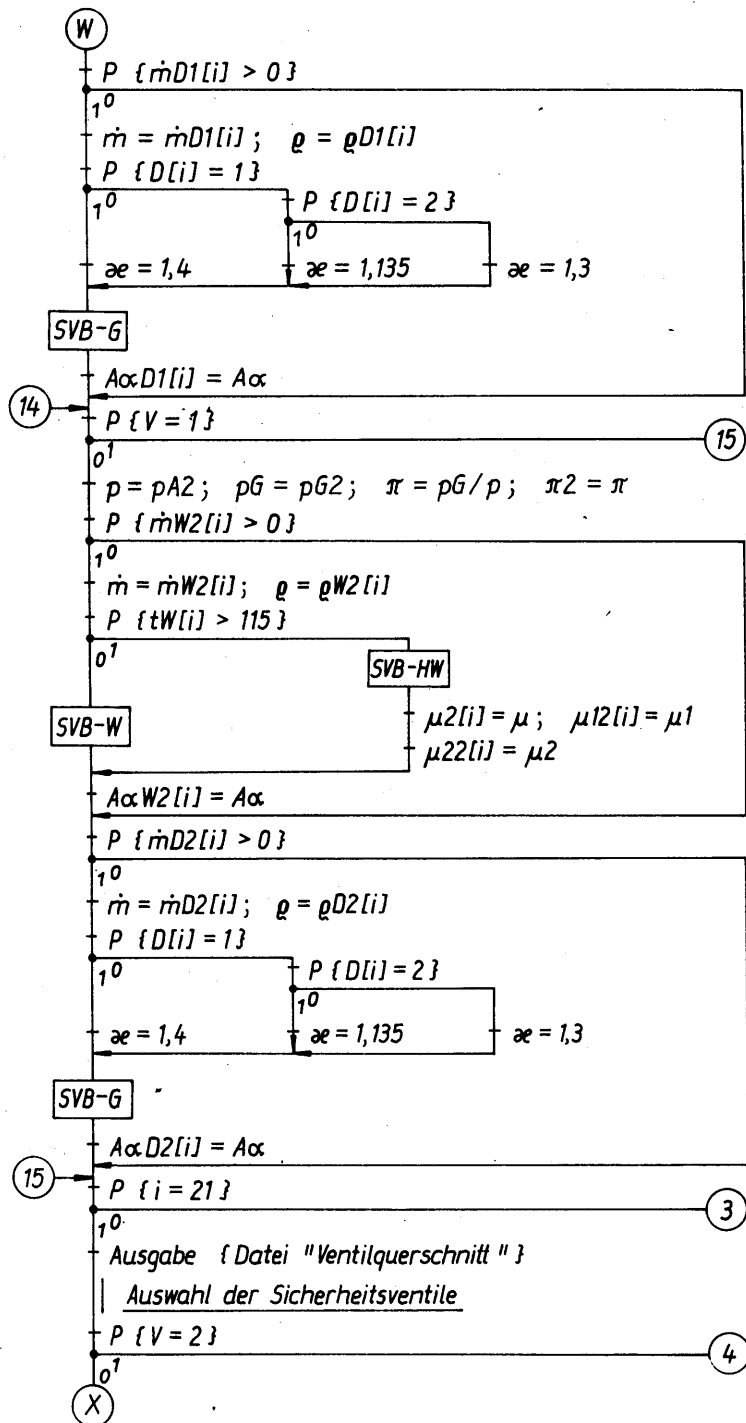


Bild 4.14(3)

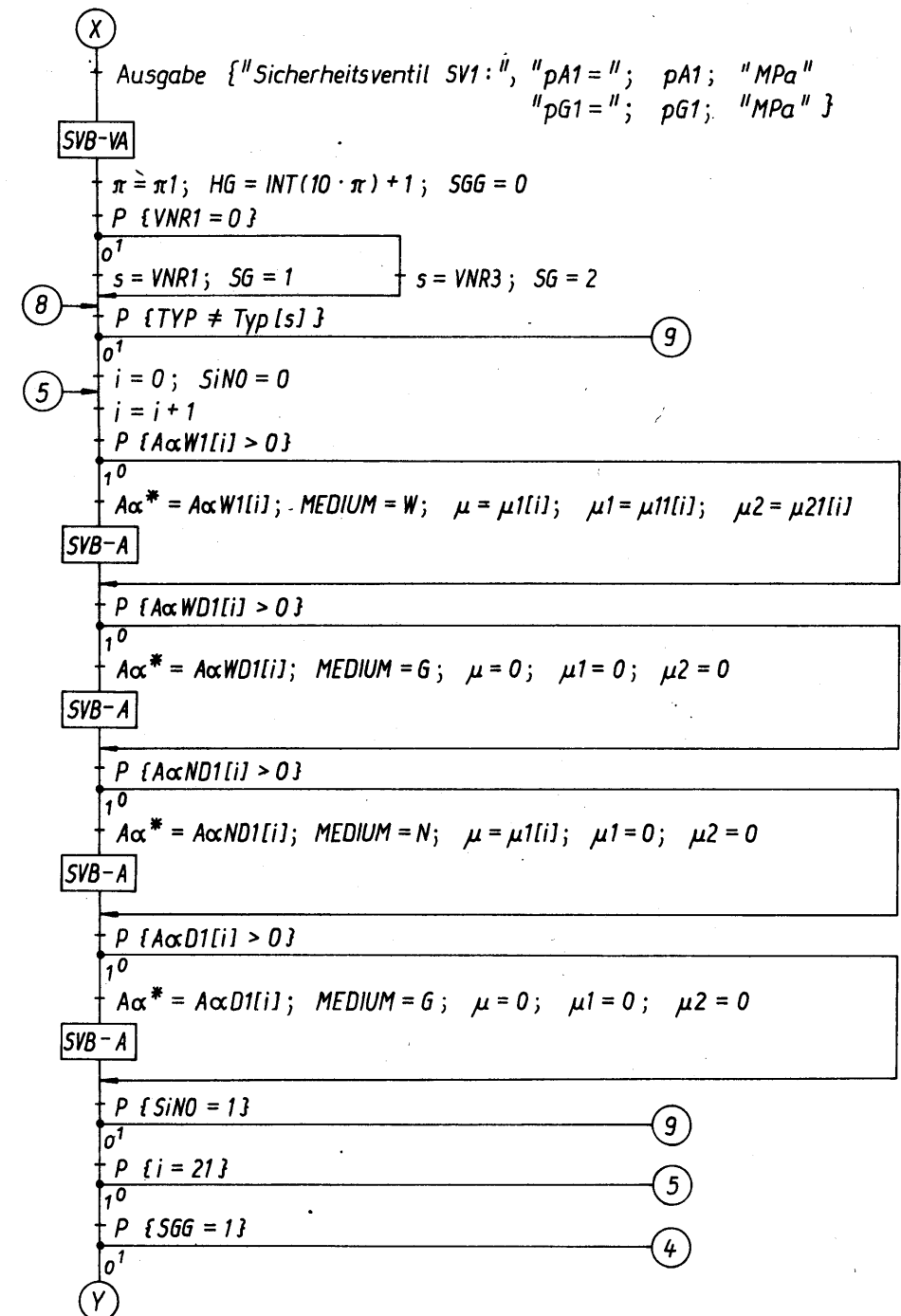


Bild 4.14(4)

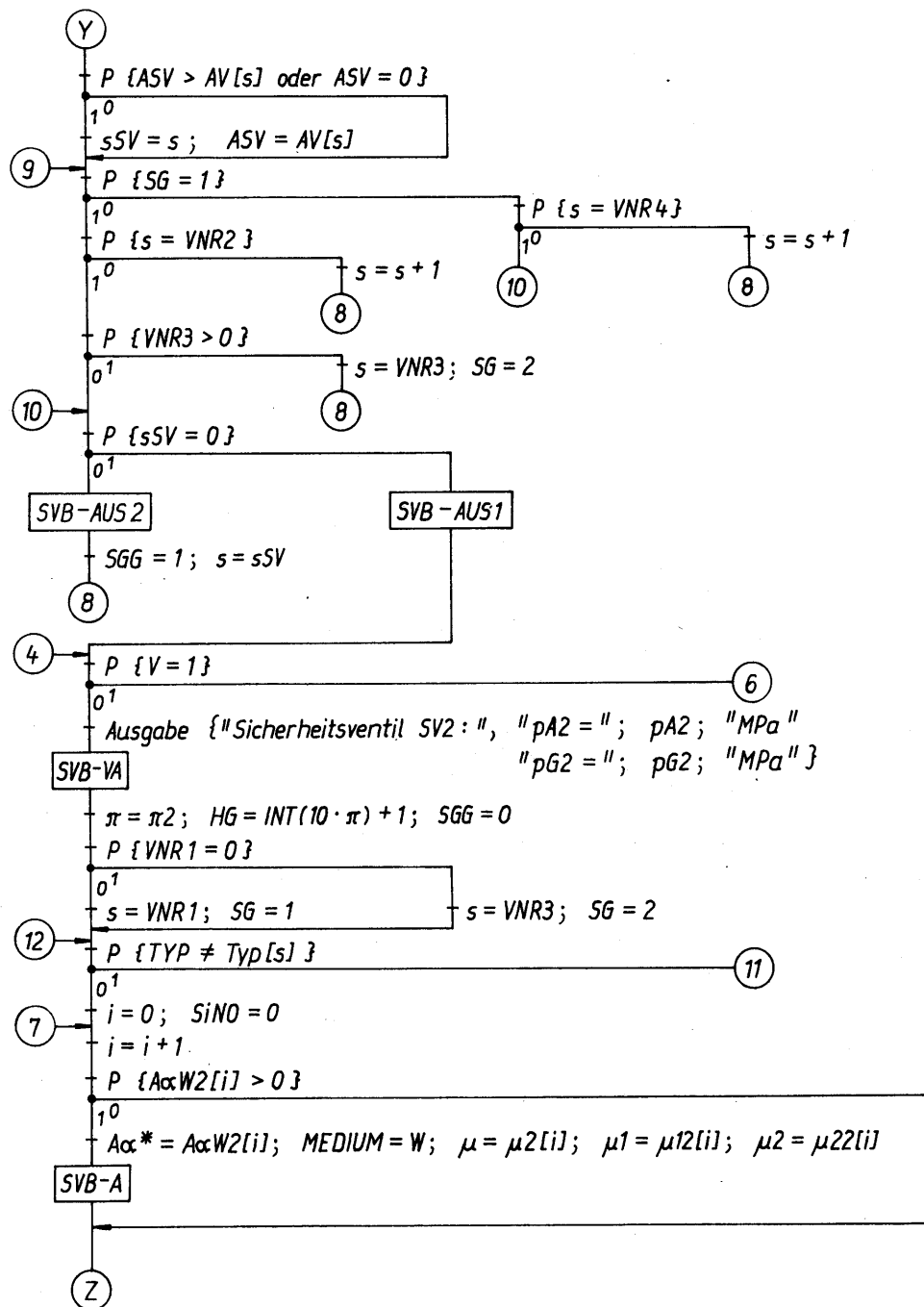


Bild 4.14(5)

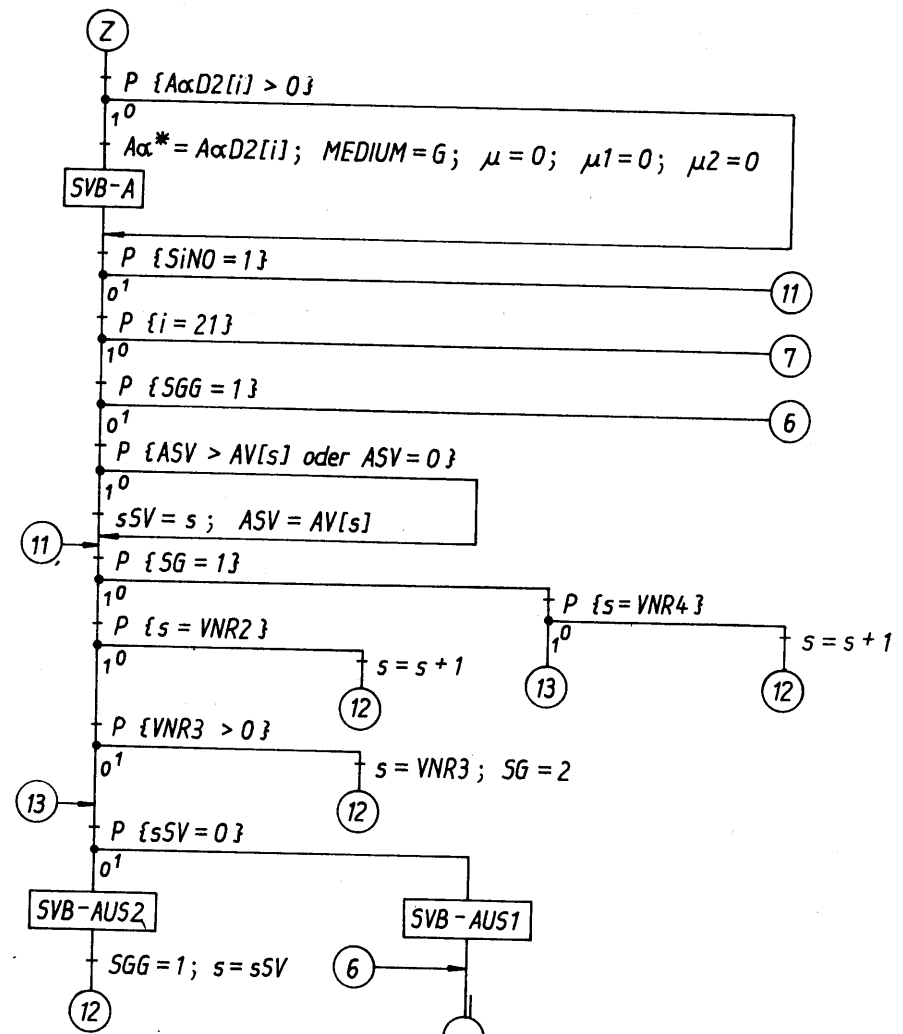


Bild 4.14(6)

Gelten gleichzeitig  $mW1[i] > 0$  und  $mWD1[i] > 0$ , so werden diese Masseströme als Komponenten eines Naßdampfstromes betrachtet.

Eine automatisierte Abarbeitung ( $HG = 2$ ) des Lastfalles X ist dann möglich, wenn ein entsprechendes Unterprogramm **[ABS-X]** existiert. Derzeit gibt es für die Lastfälle  $X = P, V, M, R, RD, H1, \dots, H12, PV$  Unterprogramme. Die Ergebnisse werden in die Datei "Lastannahmen" übernommen.

Unter Nutzung der Lösungs- und Ergänzungsmöglichkeiten, die beliebig oft aufgerufen werden können, erhält man schließlich eine **aktuelle** Datei "Lastannahmen".

Ergänzend sind die **Gegendrucke** zu benennen.

### Eingabewerte

|     |     |                                                                                  |
|-----|-----|----------------------------------------------------------------------------------|
| pG1 | MPa | Gegendruck am Austritt des Sicherheitsventils SV1 ( $p_{G1} < 0,9 \text{ pA1}$ ) |
| pG2 | MPa | Gegendruck am Austritt des Sicherheitsventils SV2 ( $p_{G2} < 0,9 \text{ pA2}$ ) |

## II. Querschnittsermittlung der Sicherheitsventile

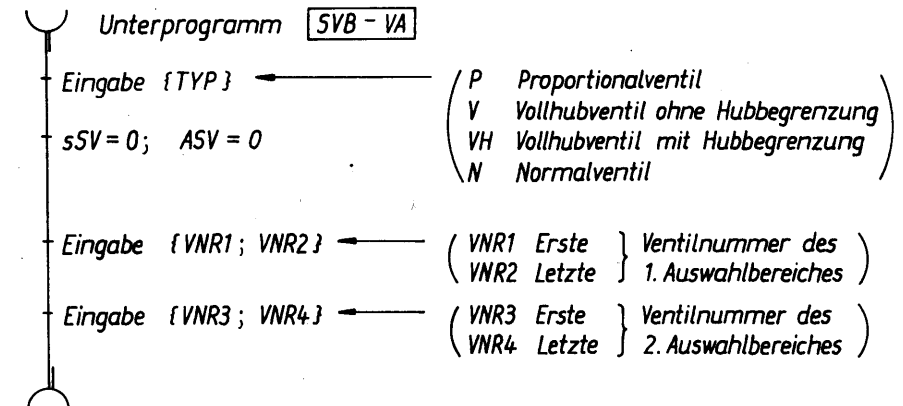
Zeilenweise (Laufnummer i) werden für alle Masseströme größer Null die modifizierten Sicherheitsventil-Querschnitte  $A_{\alpha}$  berechnet. Dabei sind mehrere Unterscheidungen zu treffen:

- Für das Sicherheitsventil SV1 gelten der Ansprechdruck  $p = p_{A1}$  und der Gegendruck  $p_G = p_{G1}$ . Analog dazu sind für SV2  $p = p_{A2}$  und  $p_G = p_{G2}$  zu setzen.
- Bei  $\dot{m}_{W1}[i] > 0$  und  $\dot{m}_{WD1}[i] = 0$  handelt es sich um reine Wasserabströmung über SV1. Das Unterprogramm **SVB-W** ist im Falle  $t_W[i] \leq 115 \text{ °C}$  für die Querschnittsermittlung maßgebend. Bei Heißwasserabströmung wird das Unterprogramm **SVB-HW** aktiviert.
- Bei  $\dot{m}_{W1}[i] = 0$  und  $\dot{m}_{WD1}[i] > 0$  bläst SV1 Wasserdampf ab. Die Querschnittsberechnung erfolgt nach **SVB-G**, wobei für  $t_{WD}[i] > t_S$  Heißdampf, ansonsten Sattdampf anzunehmen ist. Die Siedetemperatur wird mit dem Modul **TS** gemäß Anhang (Gl. (A6)) bestimmt.
- Bei  $\dot{m}_{W1}[i] > 0$  und  $\dot{m}_{WD1}[i] > 0$  führt SV1 Naßdampf ab. Es wird zur Querschnittsberechnung das Unterprogramm **SVB-ND** aufgerufen.
- Wenn  $\dot{m}_{D1}[i] > 0$  gilt, so ist Druckmedium über SV1 abzuleiten. Zur Berechnung wird das Unterprogramm **SVB-G** verwendet. Der Isentropenexponent  $\kappa$  ist durch die Art des Druckmediums  $D[i]$  determiniert.
- Bei  $\dot{m}_{W2}[i] > 0$  strömt Wasser über SV2 ab. Zur Querschnittsberechnung wird für  $t_W[i] \leq 115 \text{ °C}$  das Unterprogramm **SVB-W**, ansonsten das Unterprogramm **SVB-HW** aktiviert.
- Gilt  $\dot{m}_{D2}[i] > 0$ , so muß über SV2 Druckmedium abgeführt werden. Das Unterprogramm **SVB-G** dient zur Querschnittsberechnung. Der Isentropenexponent  $\kappa$  ist durch  $D[i]$  festgelegt.

Sind alle Lastfälle i abgearbeitet, ist die Datei "Ventilquerschnitt" gefüllt und kann ausgegeben werden. Die Belegung der Felder  $A_{\alpha W1}[i]$ ; ...;  $A_{\alpha D2}[i]$  richtet sich nach dem jeweils aufgerufenen Unterprogramm.

## III. Auswahl der Sicherheitsventile

Zuerst wird das Sicherheitsventil SV1 und danach das Ventil SV2 ausgewählt. Wegen der vorhandenen Analogie wiederholen sich einige Programmteile. Sie sind in den Bildern 4.15 bis 4.17 zusammengestellt und werden wie andere Unterprogramme aufgerufen. Da



**Bild 4.15** Flußplan des Unterprogramms **SVB-VA** (Sicherheitsventilbemessung - Vorauswahl) zur Festlegung des Ventiltyps und der Auswahlbereiche

diese aber nur ganz speziell im III. Abschnitt des Hauptprogramms verwendbar sind, werden diese sofort vorgestellt.

**SVB-VA** (Bild 4.15)

Der Programmabschnitt beinhaltet die **Vorauswahl** des Sicherheitsventils. Im Dialog wird der Ventiltyp (Proportionalventil, Vollhubventil, Vollhubventil mit Hubbegrenzung, Normalventil) abgefragt.

Weiterhin können zwei Bereiche der Datei "Sicherheitsventile" benannt werden, aus denen das geeignetste Ventil auszuwählen ist.

### Eingabewerte

| Typ                                                                                                                                                                                                    | - | Typ des Sicherheitsventils                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|----------------------------------------------------------------------------|
| VNR1                                                                                                                                                                                                   | - | Erste Ventilnummer s des ersten Auswahlbereiches                           |
| VNR2                                                                                                                                                                                                   | - | Letzte Ventilnummer s des ersten Auswahlbereiches<br>( $VNR2 \geq VNR1$ )  |
| VNR3                                                                                                                                                                                                   | - | Erste Ventilnummer s des zweiten Auswahlbereiches                          |
| VNR4                                                                                                                                                                                                   | - | Letzte Ventilnummer s des zweiten Auswahlbereiches<br>( $VNR4 \geq VNR3$ ) |
| Es muß mindestens ein Bereich angegeben werden; d.h., $VNR1 \neq 0$ oder $VNR3 \neq 0$ . Es ist möglich, daß ein Bereich zu einem Ventil der Nummer $s = VNR1 = VNR2$ oder $s = VNR3 = VNR4$ entartet. |   |                                                                            |

**SVB-A** (Bild 4.16)

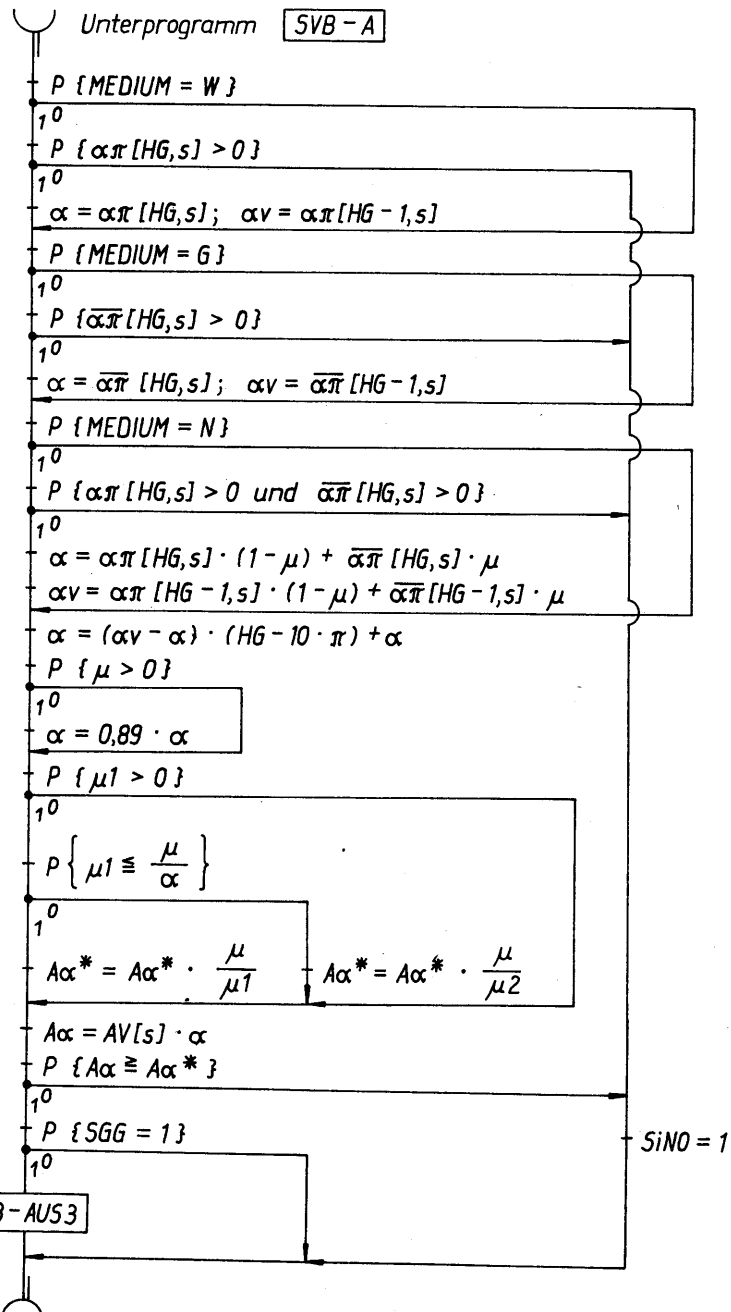


Bild 4.16 Flußplan des Unterprogramms **SVB-A** (Sicherheitsventilbemessung - Auswahl) zur Ermittlung des typ- und medienabhängigen Ventilquerschnittes

Im Programmabschnitt **Auswahl** wird geprüft, welches Produkt  $A \cdot \alpha$  (Querschnittsfläche x Ausflußziffer) sich für das Ventil  $s$  ergibt und ob dieses Sicherheitsventil geeignet ist.

Im einzelnen erfolgen die Schritte:

- Zugehörig zu HG (Hilfsgröße, die den Druckbereich kennzeichnet) und  $s$  (Nummer des Sicherheitsventils) ist aus der Datei "Sicherheitsventile"  $\alpha = \alpha\pi[HG,s]$  bzw.  $\alpha = \overline{\alpha}\pi[HG,s]$  entnehmbar. Welcher Wert in Frage kommt, wird durch die Kenngröße MEDIUM gesteuert. Es bedeuten:

| MEDIUM | Medienströmung | Maßgebende Ausflußziffer                                                     | Bemerkungen                      |
|--------|----------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| W      | Wasser         | $\alpha\pi[HG,s]$                                                            | 1) für $t_W > 115^\circ\text{C}$ |
| G      | Gas, Dampf     | $\overline{\alpha}\pi[HG,s]$                                                 |                                  |
| N      | Naßdampf       | $(1-x_{WD}) \cdot \alpha\pi[HG,s] + x_{WD} \cdot \overline{\alpha}\pi[HG,s]$ | 1) 2)                            |

1) Die Ausflußziffer wird mit dem Faktor 0,89 reduziert.

2) Der Dampfgehalt  $x_{WD}$  ist in der Datei "Ventilquerschnitt" auf  $\mu_1[i]$  gespeichert.

Ist beispielsweise  $\alpha\pi[HG,s] = 0$ , so eignet sich das Sicherheitsventil  $s$  für Wasserabströmung nicht. Ansonsten wird  $\alpha = \alpha\pi[HG,s]$  und  $\alpha_v = \alpha\pi[HG-1,s]$  gebildet. Der reale zu  $\pi$  gehörige Wert folgt aus der Interpolation:

$$\alpha = (\alpha_v - \alpha) \cdot (HG - 10 \cdot \pi) + \alpha. \quad (4.52)$$

Völlig analog ist bei Gas- und Dampfabströmung unter Verwendung von  $\overline{\alpha}\pi$  zu verfahren.

- Für Heißwasser- und Naßdampfabströmung ( $\mu > 0$ ) wird die im Abschnitt 4.2.4. definierte Ausflußziffer  $\alpha_{dp} = 0,8\alpha$  aus dem üblichen Wert  $\alpha_d = 0,9\alpha$  durch Bilden von  $\alpha = 0,89\alpha$  gewonnen.

Weiterhin erfolgt im Falle der Heißwasserabströmung die von der Ausflußziffer abhängige Korrektur des in der Datei "Ventilquerschnitt" gespeicherten Wertes  $A\alpha^*$  mit den jeweiligen Massestromdichten  $\mu_1$  oder  $\mu_2$  gemäß der Gl.n. (4.39) bis (4.42).

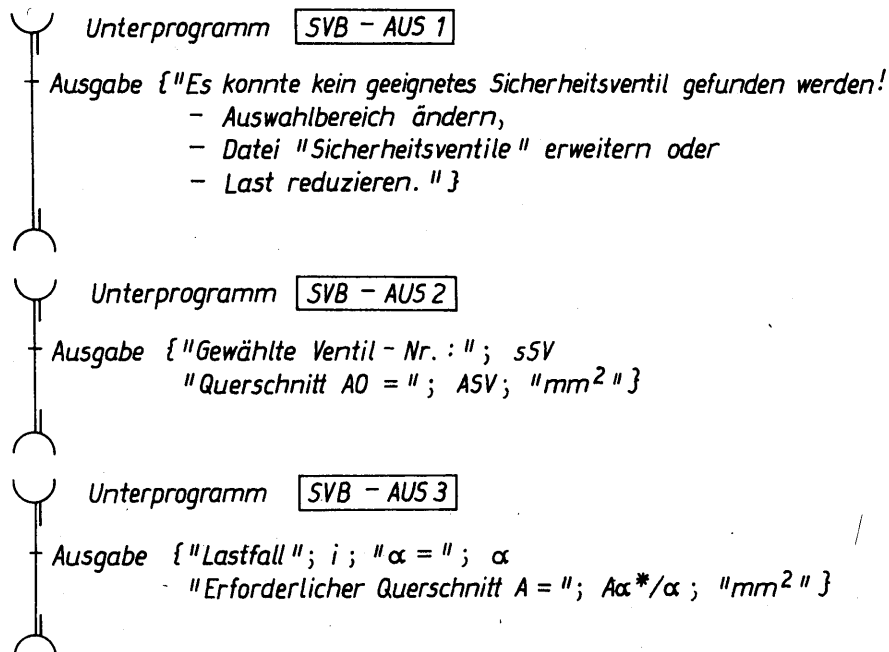
- Die modifizierte Durchflußfläche folgt mit dem Ventilquerschnitt  $AV[s]$  zu

$$A\alpha = AV[s] \cdot \alpha. \quad (4.53)$$

- Ist dieses  $A\alpha < A\alpha^*$ , der erforderlichen modifizierten Durchströmfläche, so wird die Kenngröße  $SiNO=1$  gesetzt. Gleiches geschieht, wenn im vorhandenen Druckbereich HG die Ausflußziffer  $\alpha\pi = 0$  bzw.  $\overline{\alpha}\pi = 0$  gilt.

- Im Falle der Nachrechnung des ausgewählten Ventils (SGG=1) erfolgt eine detaillierte Ausgabe der Berechnungsergebnisse.

SVB-AUS1 SVB-AUS2 SVB-AUS3 (Bild 4.17)



**Bild 4.17** Flußpläne der Unterprogramme **SVB-AUS1** bis **SVB-AUS3** (Sicherheitsventilbemessung - Ergebnisausgabe) zur eindeutigen Kennzeichnung der ausgewählten Sicherheitsventile

Diese Programmteile enthalten lediglich **Ausgabedarstellungen**.

Nunmehr kann zum **Hauptprogramm** zurückgekehrt werden. Nach der Vorauswahl **SVB-VA** wird jedes dort fixierte Sicherheitsventil auf seine Einsatzfähigkeit überprüft. Dabei erfolgen die Typüberprüfung und das Abarbeiten aller Lastfälle  $i$ , die in der Datei "Ventilquerschnitt" verzeichnet sind. Zunächst werden beim Betrachten von SV1 der Reihe nach

```

Aα* = Aα W1[i];  μ = μ1[i];  μ1 = μ11[i];  μ2 = μ21[i];  MEDIUM = W
Aα* = Aα WD1[i];  μ = 0;      μ1 = 0;      μ2 = 0;      MEDIUM = G
Aα* = Aα ND1[i];  μ = μ1[i];  μ1 = 0;      μ2 = 0;      MEDIUM = N
Aα* = Aα D1[i];   μ = 0;      μ1 = 0;      μ2 = 0;      MEDIUM = G
  
```

gesetzt. Anschließend wird der Verfahrensweg für SV2 wiederholt, wobei allerdings nur

```

Aα* = Aα W2[i];  μ = μ2[i];  μ1 = μ12[i];  μ2 = μ22[i];  MEDIUM = W
Aα* = Aα D2[i];  μ = 0;      μ1 = 0;      μ2 = 0;      MEDIUM = G
  
```

zu betrachten sind.

Ist ein Sicherheitsventil geeignet, so wird geprüft, ob es bereits einen ausgewählten Sicherheitsventil-Querschnitt ASV gibt, für den gilt:

$$ASV > AV[s] \quad \text{oder} \quad ASV = 0. \quad (4.54)$$

Bei Erfüllung des Tests werden folgende Daten abgespeichert:

```

sSV = s      Nummer des Sicherheitsventils
ASV = AV[s]  Sicherheitsventil-Querschnitt.
  
```

Diese Größen werden im Unterprogramm zur Vorauswahl **SVB-VA** auf Null gesetzt. Der Test gemäß Gl. (4.54) bewirkt, daß stets das Ventil mit dem kleinsten Querschnitt ausgewählt wird. Dieses Auswahlprinzip begründet sich durch die in der Regel gültige Tatsache, daß Sicherheitsventile mit kleineren Strömungsquerschnitten auch kleinere äußere Abmessungen aufweisen und kostengünstiger sind als solche mit größeren Strömungsquerschnitten.

Nach der Ventilauswahl erfolgt eine nochmalige Nachrechnung aller Lastfälle (Steuergröße SGG=1) mit dem Ausdruck

```

i      Lastfall
α      Ausflußziffer bei gegebenem Druckverhältnis
A      Erforderliche Durchflußfläche.
  
```

Er dient der Dokumentation und ggf. der Vorlage bei den technischen Überwachungsbehörden.

### 4.3.2. Unterprogramme zur Querschnittsbemessung

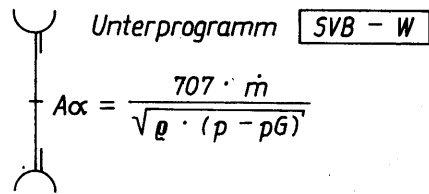
Grundlage für die Unterprogramme bilden die in den Abschnitten 4.2.2. bis 4.2.5. vorgestellten Modellierungen. Als Ergebnis wird stets die erforderliche, modifizierte Durchströmfläche  $A\alpha = A_0 \cdot \alpha_D$  bestimmt. Passend zum Hauptprogramm gelten die Größen:

|    |                       |                             |
|----|-----------------------|-----------------------------|
| p  | MPa                   | Ansprechdruck               |
| pG | MPa                   | Gegendruck                  |
| Aα | mm <sup>2</sup>       | Modifizierte Ausströmfläche |
| m  | kg/s                  | Massestrom                  |
| μ  | kg/(m <sup>2</sup> s) | Massestromdichte            |
| ρ  | kg/m <sup>3</sup>     | Dichte                      |

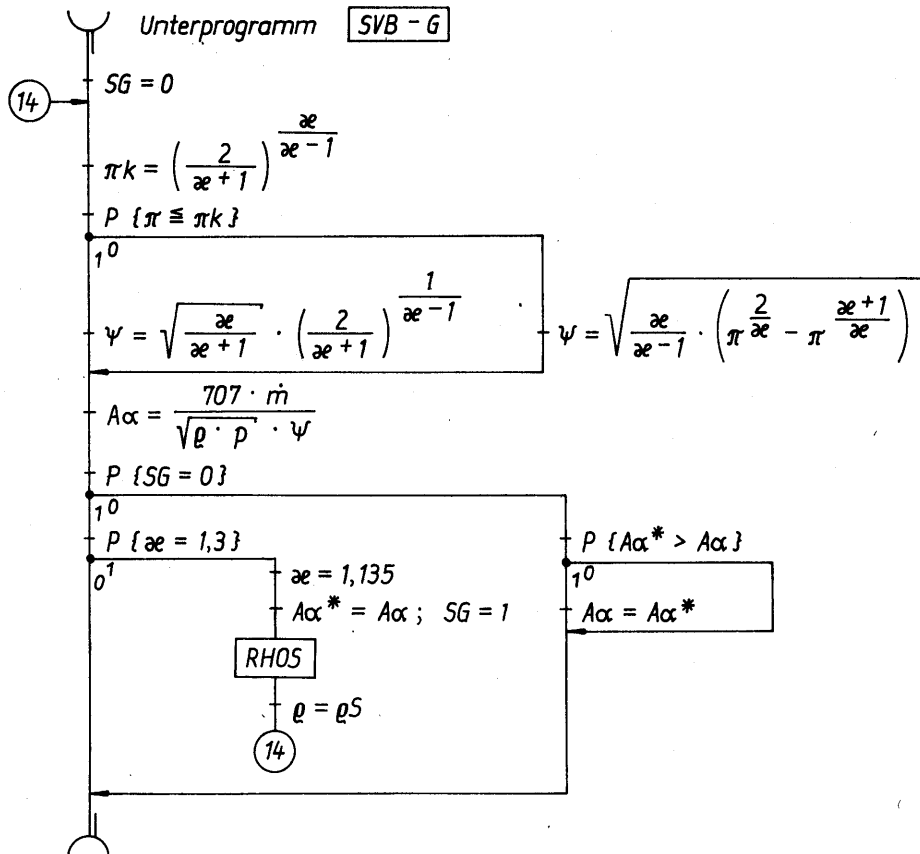
Nachfolgend werden die Unterprogramme vorgestellt.

**SVB-W** Wasserabströmung  $t_w \leq 115 \text{ }^\circ\text{C}$

Im Bild 4.18 ist Gl. (4.12) umgesetzt.



**Bild 4.18** Flußplan des Unterprogramms **SVB-W** (Sicherheitsventilbemessung - Querschnitt bei Wasserabströmung)



**Bild 4.19** Flußplan des Unterprogramms **SVB-G** (Sicherheitsventilbemessung - Querschnitt bei Gas- bzw. Dampfströmung)

### **SVB-G** Gas- bzw. Dampfabströmung

Für Luft/Stickstoff sowie Sattdampf und Heißdampf gilt Gl. (4.26), wobei die Ausflußfunktion nach Gl. (4.18) unter Beachtung des Maximalwertes und des kritischen Druckverhältnisses (Gl. (4.22)) zu bestimmen ist. Bild 4.19 gibt den Datenflußplan wieder. Im Falle der Heißdampfabströmung wird zusätzlich eine Nachrechnung für Sattdampf vorgenommen und das größte  $A\alpha$  verwendet (vgl. Abschnitt 4.2.3. - Anmerkung 3 -).

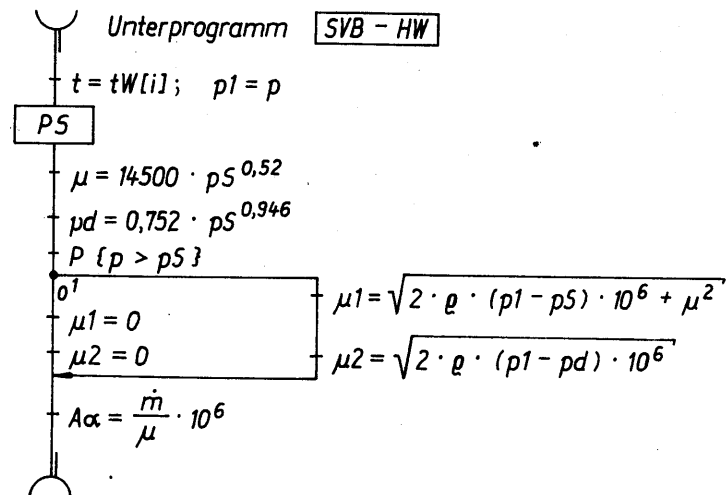
### **SVB-HW** Heißwasserabströmung

Die modifizierte Durchströmfläche wird ausgehend von Gl. (4.40) bestimmt, wobei für  $\mu$  die Massestromdichte von abfließendem Siedewasser  $\mu_d$  nach Gl. (4.45) eingesetzt wird. Weiterhin erfolgt die Ermittlung der Massestromdichten des unterkühlten Wassers  $\mu_1$  und  $\mu_2$  gemäß den Gln. (4.43) und (4.44).

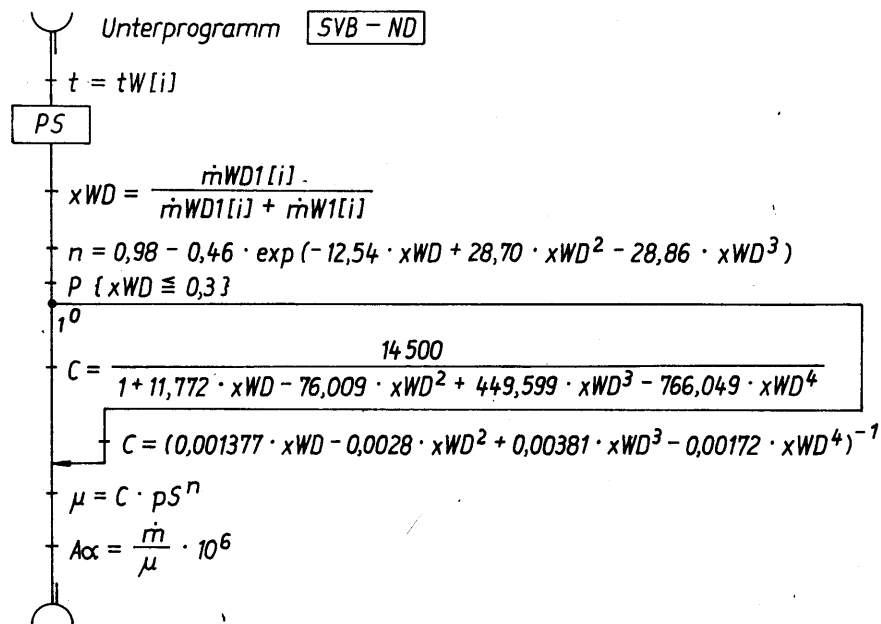
Der Berechnungsablauf ist im Bild 4.20 dargestellt. Außer dem Hauptergebnis  $A\alpha$  werden die Werte  $\mu$ ,  $\mu_1$  und  $\mu_2$  für die eventuelle spätere Umrechnung gespeichert.

### **SVB-ND** Naßdampfabströmung

Die Werte für Naßdampf entstammen der Datei "Lastannahmen" (Bild 3.17). Es gelten die Einzelkomponenten  $\dot{m}W1[i]$  und  $\dot{m}WD1[i]$ , woraus der Dampfgehalt



**Bild 4.20** Flußplan des Unterprogramms **SVB-HW** (Sicherheitsventilbemessung - Querschnitt bei Heißwasserabströmung)



**Bild 4.21** Flußplan des Unterprogramms **SVB-ND** (Sicherheitsventilbemessung - Querschnitt bei Naßdampfabströmung)

$$xWD = \frac{\dot{m}_{WD1}[i]}{\dot{m}_{WD1}[i] + \dot{m}_{W1}[i]}$$

folgt. In Abhängigkeit dieses Wertes und des Sättigungsdruckes werden dann in der im Bild 4.21 dargestellten Reihenfolge die Gln. (4.47) und (4.50) ausgewertet.

Der Dampfgehalt  $xWD$  wird zur späteren Bestimmung der Ausflußziffer gespeichert.

### 4.3.3. Beispiele

Die im Abschnitt 4.2.7. manuell durchgerechneten Beispiele 1 bis 6 sind mit dem vorgestellten Programmsystem abgearbeitet worden. Die Datei "Sicherheitsventile" enthielt die im Bild 4.13 angegebenen Werte. Zusätzlich wurde unter  $s = 50$  ein Vollhubventil V mit dem Querschnitt  $AV = 2000 \text{ mm}^2$  und der Ausflußziffer  $\alpha\pi[0, \dots, 3] = 0,59$  aufgenommen.

Die nachfolgenden Rechnerprotokolle geben die Ergebnisse wieder:

#### Beispiel 1 (Kaltwasserabströmung)

| SICHERHEITSVENTILE          | Bemessung         | Bild 1                                             |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1:      |                   |                                                    |
| Ansprechdruck               | pA1 = 0.6500 MPa  | Gegendruck pG1 = 0.1000 MPa                        |
| TYP: P (Proportionalventil) | Auswahlbereich 1: | VNR1 1<br>VNR2 11                                  |
|                             | Auswahlbereich 2: | VNR3 0<br>VNR4 0                                   |
| Gewählte Ventil- Nr.:       | 5                 | Querschnitt A0 = 804 mm <sup>2</sup>               |
| Lastfall :                  | 1      α = 0.25   | Erforderlicher Querschnitt A = 632 mm <sup>2</sup> |

| SICHERHEITSVENTILE          | Bemessung         | Bild 1                                             |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1:      |                   |                                                    |
| Ansprechdruck               | pA1 = 0.6500 MPa  | Gegendruck pG1 = 0.3000 MPa                        |
| TYP: P (Proportionalventil) | Auswahlbereich 1: | VNR1 1<br>VNR2 11                                  |
|                             | Auswahlbereich 2: | VNR3 0<br>VNR4 0                                   |
| Gewählte Ventil- Nr.:       | 5                 | Querschnitt A0 = 804 mm <sup>2</sup>               |
| Lastfall :                  | 1      α = 0.25   | Erforderlicher Querschnitt A = 793 mm <sup>2</sup> |

#### Beispiel 2 (Gasabströmung)

| SICHERHEITSVENTILE     | Bemessung         | Bild 1                                            |
|------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1: |                   |                                                   |
| Ansprechdruck          | pA1 = 0.8500 MPa  | Gegendruck pG1 = 0.1000 MPa                       |
| TYP: V (Vollhubventil) | Auswahlbereich 1: | VNR1 1<br>VNR2 11                                 |
|                        | Auswahlbereich 2: | VNR3 20<br>VNR4 40                                |
| Gewählte Ventil- Nr.:  | 20                | Querschnitt A0 = 201 mm <sup>2</sup>              |
| Lastfall :             | 1      α = 0.78   | Erforderlicher Querschnitt A = 96 mm <sup>2</sup> |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E         | Bemessung                                                                   | Bild 1                                            |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1:                      |                                                                             |                                                   |
| Ansprechdruck $p_{A1} = 0.8500 \text{ MPa}$ | Gegendruck $p_{G1} = 0.5000 \text{ MPa}$                                    |                                                   |
| TYP: V (Vollhubventil)                      | Auswahlbereich 1: VNR1 1<br>VNR2 11<br>Auswahlbereich 2: VNR3 20<br>VNR4 40 |                                                   |
| Gewählte Ventil- Nr.: 20                    | Querschnitt $A_0 = 201 \text{ mm}^2$                                        |                                                   |
| Lastfall : 1                                | $\alpha = 0.65$                                                             | Erforderlicher Querschnitt $A = 117 \text{ mm}^2$ |

## Beispiel 3 (Sattdampfabströmung)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E         | Bemessung                                                                  | Bild 1                                             |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1:                      |                                                                            |                                                    |
| Ansprechdruck $p_{A1} = 1.3000 \text{ MPa}$ | Gegendruck $p_{G1} = 0.1000 \text{ MPa}$                                   |                                                    |
| TYP: V (Vollhubventil)                      | Auswahlbereich 1: VNR1 50<br>VNR2 50<br>Auswahlbereich 2: VNR3 0<br>VNR4 0 |                                                    |
| Gewählte Ventil- Nr.: 50                    | Querschnitt $A_0 = 2000 \text{ mm}^2$                                      |                                                    |
| Lastfall : 1                                | $\alpha = 0.59$                                                            | Erforderlicher Querschnitt $A = 1818 \text{ mm}^2$ |

## Beispiel 4 (Heißdampfabströmung)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E         | Bemessung                                                                  | Bild 1                                             |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1:                      |                                                                            |                                                    |
| Ansprechdruck $p_{A1} = 1.3000 \text{ MPa}$ | Gegendruck $p_{G1} = 0.1000 \text{ MPa}$                                   |                                                    |
| TYP: V (Vollhubventil)                      | Auswahlbereich 1: VNR1 50<br>VNR2 50<br>Auswahlbereich 2: VNR3 0<br>VNR4 0 |                                                    |
| Gewählte Ventil- Nr.: 50                    | Querschnitt $A_0 = 2000 \text{ mm}^2$                                      |                                                    |
| Lastfall : 1                                | $\alpha = 0.59$                                                            | Erforderlicher Querschnitt $A = 1819 \text{ mm}^2$ |

## Beispiel 5 (Heißwasserabströmung)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E         | Bemessung                                                                 | Bild 1                                            |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1:                      |                                                                           |                                                   |
| Ansprechdruck $p_{A1} = 1.8000 \text{ MPa}$ | Gegendruck $p_{G1} = 0.1000 \text{ MPa}$                                  |                                                   |
| TYP: P (Proportionalventil)                 | Auswahlbereich 1: VNR1 1<br>VNR2 11<br>Auswahlbereich 2: VNR3 0<br>VNR4 0 |                                                   |
| Gewählte Ventil- Nr.: 5                     | Querschnitt $A_0 = 804 \text{ mm}^2$                                      |                                                   |
| Lastfall : 1                                | $\alpha = 0.22$                                                           | Erforderlicher Querschnitt $A = 688 \text{ mm}^2$ |

## Beispiel 6 (Naßdampfabströmung)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E         | Bemessung                                                                 | Bild 1                                             |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| SICHERHEITSVENTIL SV1:                      |                                                                           |                                                    |
| Ansprechdruck $p_{A1} = 0.8500 \text{ MPa}$ | Gegendruck $p_{G1} = 0.1000 \text{ MPa}$                                  |                                                    |
| TYP: P (Proportionalventil)                 | Auswahlbereich 1: VNR1 1<br>VNR2 11<br>Auswahlbereich 2: VNR3 0<br>VNR4 0 |                                                    |
| Gewählte Ventil- Nr.: 8                     | Querschnitt $A_0 = 3117 \text{ mm}^2$                                     |                                                    |
| Lastfall : 1                                | $\alpha = 0.22$                                                           | Erforderlicher Querschnitt $A = 2780 \text{ mm}^2$ |

## 5. Einbaubedingungen für Sicherheitsventile

Die wichtigen Faktoren

- **Funktionstüchtigkeit**
- **Wartungsmöglichkeit**
- **Umweltbelastung**

werden ursächlich von den Einbaubedingungen beeinflusst. Deshalb sind die nachfolgenden Problemkreise eingehend zu betrachten:

- ▶ **Rohrtechnische Anbindung** (Zuleitung und Abblaseleitung) unter rohrstatischen und hydraulischen Gesichtspunkten
- ▶ **Platzmäßige Einordnung** des Sicherheitsventils
- ▶ **Medienableitung** unter Beachten des Geräuschpegels, der Phasenseparation und der Entsorgung.

Selbstverständlich müssen die genannten Punkte nicht alle separat im Hinblick auf den Sicherheitsventileinsatz theoretisch abgeleitet und angewendet werden. Vielmehr soll die gegebene Auflistung daran erinnern, daß beispielsweise die Zu- und Ableitung des Sicherheitsventils in die gesamte rohrstatische Berechnung der Anlage - unter Beachtung spezieller Einflüsse - einzubeziehen sind usw.

Auf einige dieser Besonderheiten wird im weiteren eingegangen. Generell sind natürlich die in /17/ und /20/ gegebenen Einbauvorschriften und die Hinweise in den Herstellerdokumentationen zu beachten.

### 5.1. Installationsgrundsätze

Am günstigsten ist der **direkte Anschluß** des Sicherheitsventils an einem Stutzen des Druckbehälters. Der Stutzen sollte dabei auf die Behälterwandung - möglichst mit strömungstechnisch gutem Einlauf - aufgesetzt sein. Stutzen mit schlechten Einlaufbedingungen, z.B. durchgesteckte Stutzen, bewirken nach /32/ Reduzierungen der Abblaseströme bis 5 %.

Der Anschluß des Druckstutzens ist möglichst an einer Stelle des Druckraumes vorzunehmen, dessen statischer Druck nur sehr wenig von den dynamischen Strömungsbedingungen beeinflusst wird.

Bei Anordnung einer **Zuleitung** vom Behälter zum Sicherheitsventil muß diese mindestens den gleichen Innendurchmesser wie der Ventileintrittsstutzen haben. Der Druckverlust bei maximaler Abblaseleistung ist so klein als möglich zu halten (kurze Leitungen, wenig Einzelwiderstände, strömungsgünstige Einbindungen). Er darf keinesfalls die

Schließdruckdifferenz des Sicherheitsventils überschreiten, da dies sonst ein lauffähiges Öffnen und Schließen des Ventils bewirkt.

Bei warmgehenden Leitungen sollten die Zuleitung und das Gehäuse des Sicherheitsventils - nicht aber die Federnhaube - mit einer Wärmedämmung versehen werden. Bei Einfriergefahr ist eine Zirkulation zu sichern.

Dampfleitungen sind so zu verlegen, daß eine Selbstentwässerung gewährleistet wird. Keinesfalls darf sich Kondensat vor dem Ventilsitz ansammeln.

Die **Abblaseleitung** muß mindestens den gleichen Innendurchmesser wie der Austrittsflansch haben. Generell sollte die Abblaseleitung möglichst kurz und strömungsgünstig verlegt sein.

In speziellen Fällen kann die Abblaseleitung entfallen, so beispielsweise bei Sicherheitsventilen auf Druckluftbehältern, wenn durch den Abblasestrom keine Gefährdungen auftreten.

Das Ableiten des Wasserdampfes erfolgt nach oben - in der Regel über Dach - gefahrlos ins Freie. Die Abblaseleitung und gegebenenfalls das Ventilgehäuse müssen zur Kondensatableitung stets geöffnete Entwässerungen aufweisen. Um einen Dampfaustritt über diese Entwässerungen zu vermeiden, sind Wasserschleifen vorzusehen. Die Höhe der Wasserschleife muß mindestens dem Druckverlust in der Abblaseleitung das Gleichgewicht halten. Die Durchmesser der Entwässerungen sind in Abhängigkeit der Lastfälle, des Kondensatanfalls und der Anzahl der Entwässerungen nach ingenieurmäßigen Gesichtspunkten festzulegen.

Wasser mit einer Temperatur  $\leq 115$  °C wird nach unten abgeleitet. Wenn die Temperatur  $\leq 35$  °C beträgt, kann das abströmende Wasser unmittelbar in das Kanalisationssystem geführt werden. Eine Sichtkontrolle ist anzuordnen. Bei Temperaturen  $> 35$  °C hat der Ausfluß in eine Kühlgrube oder einen Mischbehälter zu erfolgen. Die Funktionstüchtigkeit des Abblasesystems muß prüfbar sein.

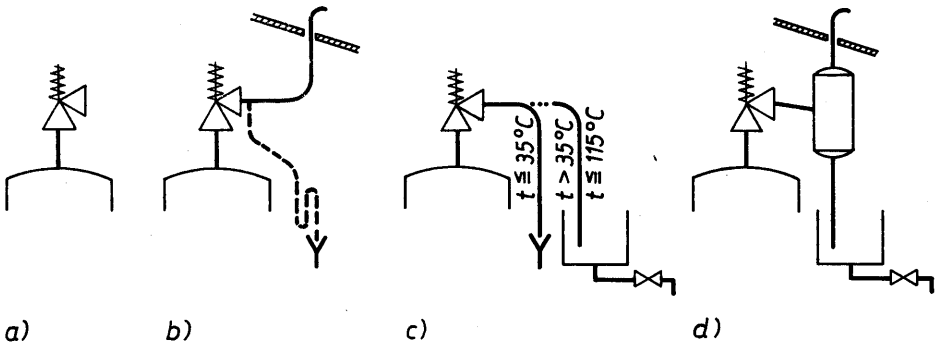
Bei Ableitung von Heißwasser oder Naßdampf sind die nach der Entspannung vorliegenden Phasen zu separieren, weshalb Trenngefäße mit ausreichend großen Abführungen dem Sicherheitsventil nachgeschaltet werden müssen. Wasserdampf und Wasser sind dann nach den vorgenannten Gesichtspunkten abzuleiten.

Bild 5.1 zeigt einige grundsätzliche Varianten von Abblasesystemen. Eine detaillierte Zuordnung findet sich im Abschnitt 5.3.2., Tabelle 5.1.

Zur Verminderung der Lärmemission werden vielfach Schalldämpfer in die Abblaseleitungen eingebaut. Bei der Auslegung sind die Ventil-, Strömungs- und Ausblasegeräusche zu beachten. Die Berechnung sollte sich dabei auf den maximalen Abblasestrom, der bei Ansetzen der Ausflußziffer  $\alpha > \alpha_d$  und des Öffnungsdruckes  $p_{\text{öff}} > p_A$  auftritt, beziehen.

Um Fluidverluste zu vermeiden und zur Senkung der Umweltbelastung werden zunehmend die Abblaseleitungen in Auffangsysteme niedrigeren Druckes geführt.

Die Abblasesysteme sind vor Einfriergefahr zu schützen.



**Bild 5.1** Prinzipielle Gestaltung der Abblasesysteme

- a) Direkter Ausblas ins Freie, anwendbar für ungefährliche Gase mit angenäherter Umgebungstemperatur, z.B. Druckluft
- b) Abblaseleitung über Dach für Wasserdampf mit einer Entwässerung, die nach einer Stauschleife sichtbar mündet
- c) Abblaseleitung für Wasser  $\leq 115^\circ\text{C}$
- d) Abblasesystem für Heißwasser  $> 115^\circ\text{C}$  oder für Naßdampf mit nachgeschaltetem Trenngefäß, wobei der Wasserdampf über Dach und das Wasser in ein Kühlbecken oder Mischgefäß fließen

Die **Funktion der Sicherheitsventile** darf durch die Zu- und Abblaseleitungen in keiner Weise beeinträchtigt werden.

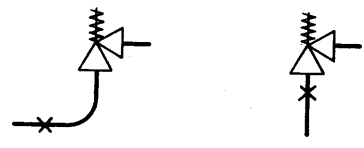
Dies betrifft sowohl die Druckverhältnisse im Abblasefall als auch die Wirkung statischer und dynamischer Rohrkräfte.

Treten Fremdgedrücke auf, so dürfen nach /17/ nur Sicherheitsventile mit geschlossenem Gehäuse eingesetzt werden. Konstante Fremdgedrücke werden durch die entsprechende Wahl des Einstelldruckes (entsprechende Federwahl) berücksichtigt. Variable Fremdgedrücke sind durch den Einsatz von Sicherheitsventilen mit Druckausgleichsfaltenbalg zu kompensieren.

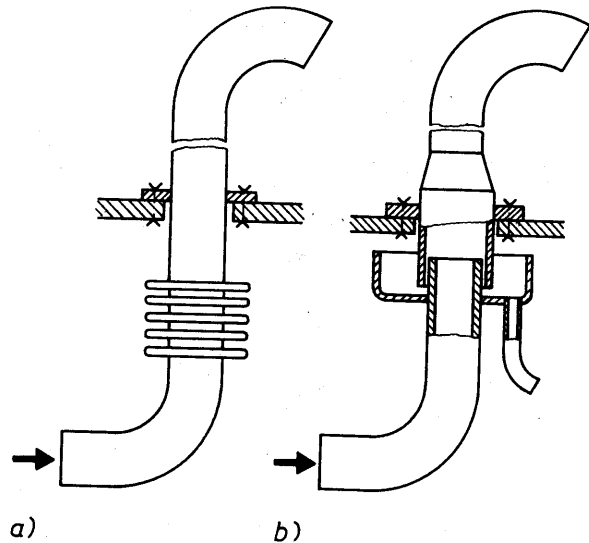
Die Kräfte und Momente, die aus dem Leitungssystem (Zuleitung und Abblaseleitung) infolge Wärmedehnung und Gewichts sowie aus dem Abblasevorgang durch Rückstoß und Geschwindigkeitsänderung resultieren, sind weitestgehend vom Ventil fernzuhalten. Das Sicherheitsventil sollte in der Regel kein Festpunkt sein. Im Ausnahmefall ist das Ventilgehäuse durch spezielle Abstützpratzen zu sichern.

Die in den Bildern 5.2 und 5.3 gezeigten Skizzen geben einige Hinweise zur möglichen konstruktiven Ausführung.

Der **Einbau des Sicherheitsventils** hat so zu erfolgen, daß eine gute Zugänglichkeit und Wartung gewährleistet ist. In der Umgebung des Sicherheitsventils und der Abblaseleitung sollten Fluchtwege markiert sein.



**Bild 5.2** Fixierung der Zuleitung durch einen Festpunkt zur Reduzierung der auf das Sicherheitsventil wirkenden Rohrkräfte



**Bild 5.3** Fixierung der Abblaseleitung durch einen Festpunkt zur Reduzierung der auf das Sicherheitsventil wirkenden Rohrkräfte

- a) Anordnung eines Dehnungskompensators
- b) Trennung der Abblaseleitung in einen kurzen, am Ventil befestigten Abschnitt mit Kondensatsammeltasse und getrenntem, übergestecktem Hauptteil

## 5.2. Bemessung der Zuleitung

### 5.2.1. Zulässiger Druckverlust

In den gesetzlichen Vorschriften sind die zulässigen Druckverluste in Abhängigkeit des Ansprechdruckes der Sicherheitsventile festgelegt.

Nach /17/ gelten für den Normalfall

$$\Delta p_{Zu, zul} \leq 0,03 (p_A - 0,1 \text{ MPa}) \quad (5.1)$$

und bei Einsatz eines Sicherheitsventils, dessen Schließverhalten vom Druckverlust in der Zuleitung beeinflusst wird,

$$\Delta p_{Zu, zul} \leq \Delta p_{Sch} - 0,02 (p_A - 0,1).$$

Mit der im Abschnitt 4.2.1. gegebenen Definition für die Schließdruckdifferenz  $\Delta p_{\text{Sch}}$  und dem in Gl. (2.8) eingeführten Faktor  $\sigma$  folgt:

$$\Delta p_{\text{Zu,zul}} \leq (0,98 - \sigma) (p_A - 0,1). \quad (5.2)$$

Da in der Regel die relativen Schließdruckdifferenzen  $> 5\%$  sind und somit  $\sigma < 0,95$  gilt, kann Gl. (5.1) im Bereich der Heizungstechnik als uneingeschränkt gültig angenommen werden.

In /20/ sind ähnliche Forderungen aufgeführt. So gilt für eine Schließdruckdifferenz  $> 5\%$  ( $\sigma < 0,95$ ) die Gl. (5.1), ansonsten ist Gl. (5.2) zu verwenden.

### 5.2.2. Nachweis des Druckverlustes

Es ist am rationellsten, einen geometrisch fixierten Vorschlag für eine Zuleitung bezüglich der Geschwindigkeit  $w$  und des Druckverlustes  $\Delta p_{\text{Zu}}$  nachzurechnen und je nach Ergebnis gegebenenfalls zu verändern. Als Maximalgeschwindigkeiten werden empfohlen:

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| Wasser    | $< 3 \text{ m/s}$    |
| Gas/Dampf | $< 60 \text{ m/s}$   |
| Naßdampf  | $< 40 \text{ m/s}$ . |

Die Druckverlustermittlung kann nach /8/ auf manueller und maschineller Basis erfolgen. Wegen des zulässigen geringen Druckabfalls können auch für kompressible Medien die hydrodynamischen Beziehungen angesetzt werden (vgl. /8, S. 145, Gl. (7.20)/). Somit gelten analog /8, S. 86 u.f./ für die Bilanz der modifizierten Gesamtdrücke

$$\Delta p = \left( \lambda \frac{1}{d} + \sum \xi \right) \frac{\rho}{2} w^2 = \left( \lambda \frac{1}{d} + \sum \xi \right) \frac{w^2}{2 v} = R + S \sum \xi \quad (5.3)$$

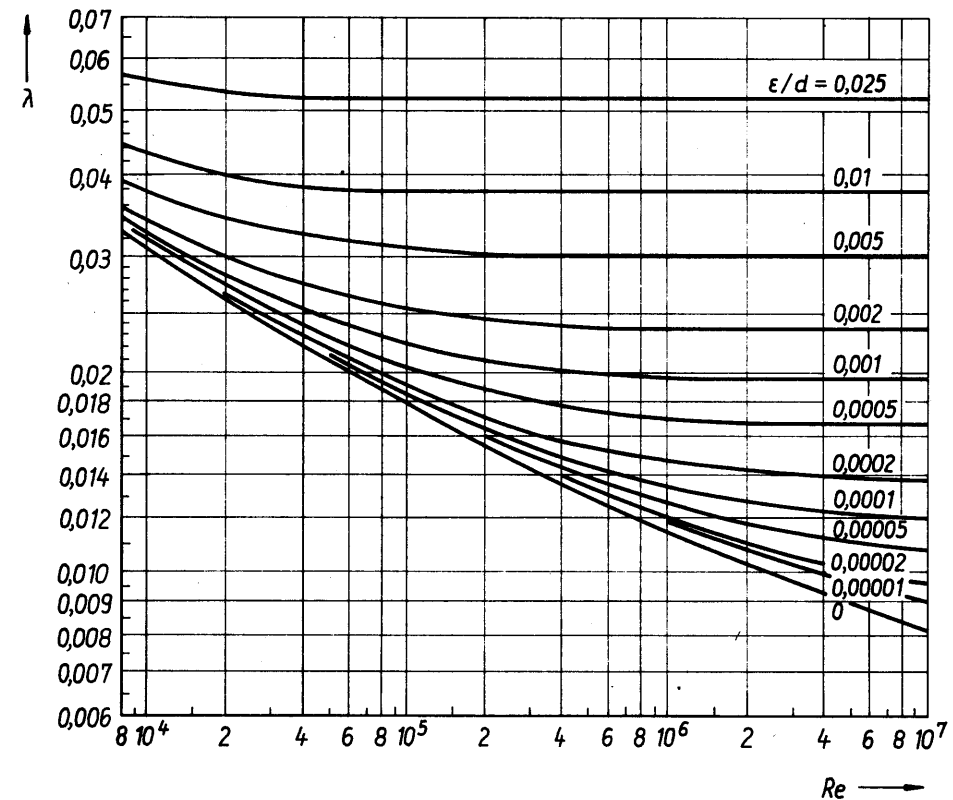
$$w = \frac{4 \dot{m}}{\rho \pi d^2} = \frac{4 \dot{m} v}{\pi d^2} \quad (5.4)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \dot{m}}{\eta \pi d} = \frac{w d}{\eta v} \quad (5.5)$$

$\lambda = \lambda(\epsilon/d; \text{Re})$  nach Bild 5.4,

mit den Größen

|            |                             |             |                                   |
|------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------------|
| $l$        | Rohrlänge                   | $\rho$      | Dichte                            |
| $d$        | Rohrinnendurchmesser        | $v$         | Spezifisches Volumen              |
| $\lambda$  | Rohrreibungsbeiwert         | $\eta$      | Dynamische Viskosität             |
| $\epsilon$ | Rohrrauigkeit               | $\text{Re}$ | REYNOLDS-Zahl                     |
| $\sum \xi$ | Summe der Einzelwiderstände | $R$         | Spezifischer Druckverlust         |
| $\dot{m}$  | Massestrom                  | $S$         | Staudruck                         |
| $w$        | Geschwindigkeit             |             | ( $R$ und $S$ aus /8, Tabellen/). |

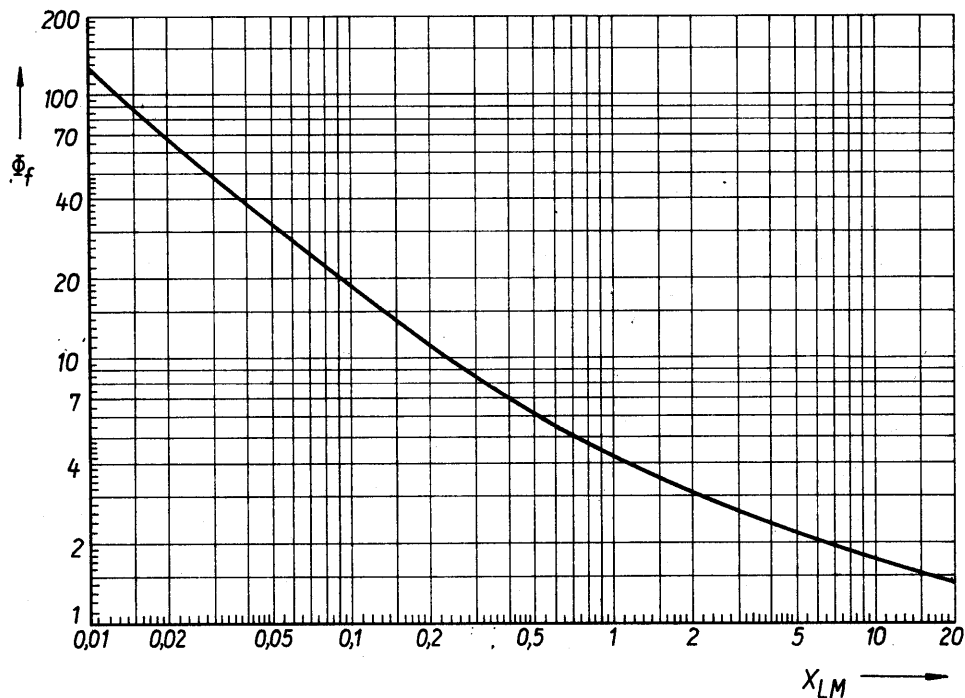


**Bild 5.4** Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  für gerade, turbulent durchströmte Rohre in Abhängigkeit der REYNOLDS-Zahl und der relativen Rauigkeit

Um das Berechnungsverfahren abzukürzen, kann näherungsweise  $\lambda = 0,02$  verwendet werden.

Für den speziellen Fall der Zweiphasenströmung (Naßdampf) ist der in /8, S. 212/ angegebene Algorithmus für waagerechte Rohrleitungen zu verwenden. Die Gl. (5.3) bis (5.5) sind bezogen auf jede Phase ( $f$  - Wasser und  $g$  - Dampf) anzuwenden und  $\Delta p_f$  bzw.  $\Delta p_g$  zu berechnen. Mit dem sogenannten LOCKHART-MARTINELLI-Parameter

$$X_{\text{LM}} = \sqrt{\frac{\Delta p_f}{\Delta p_g}} \quad (5.6)$$



**Bild 5.5** Korrekturfaktor  $\Phi_f$  für turbulente Strömung der Einzelphasen in Abhängigkeit des LOCKHART-MARTINELLI-Parameters

folgt aus Bild 5.5 der Korrekturfaktor  $\Phi_f$ . Damit ergibt sich der Druckverlust der Zweiphasenströmung

$$\Delta p_Z = \Phi_f^2 \cdot \Delta p_e \quad (5.7)$$

Die mittlere Geschwindigkeit des Zweiphasengemischs folgt aus den Geschwindigkeiten der Einzelphasen  $w_f$  und  $w_g$  zu

$$w = w_g + w_f \quad (5.4a)$$

#### Anmerkung 1

Die Druckverlustrechnung nach Gl. (5.3) beinhaltet die hydrostatisch bedingten, d.h. die höhenabhängigen Druckänderungen, nicht mit. Sie sind bei der Festlegung der Ansprechdrücke bereits beachtet worden (vgl. Gl.n. (2.3) und (2.4)). Sicherheitshalber sollte auch bei einer Zweiphasenströmung in den genannten Gleichungen die Dichte für Wasser  $\rho_w$  Eingang finden.

#### Anmerkung 2

In einigen Vorschriftenwerken und Herstellerdokumentationen sind vereinfachte, stark annahmenbehaftete Berechnungsverfahren zur zulässigen Rohrlänge der Zuleitung enthalten. Es ist jedoch nicht einzusehen, daß für das Element "Zuleitung" eine vom üblichen Berechnungsalgorithmus abweichende, ungenauere Lösung verwendet werden sollte.

### 5.2.3. Beispiele

#### Beispiel 1 (Wasserabströmung)

Der Wasserstrom  $\dot{m}_w = 5,2 \text{ kg/s}$  ( $t = 60 \text{ °C}$ ) soll über ein Proportional Sicherheitsventil mit dem Ansprechdruck  $p_A = 0,65 \text{ MPa}$  in ein Auffangsystem mit dem Gegendruck  $p_G = 0,3 \text{ MPa}$  abgeleitet werden. Es ist die in Gl. (5.1) formulierte Forderung zu überprüfen, wenn die Zuleitung die im Bild 5.6 skizzierte Form aufweist.

#### Lösung

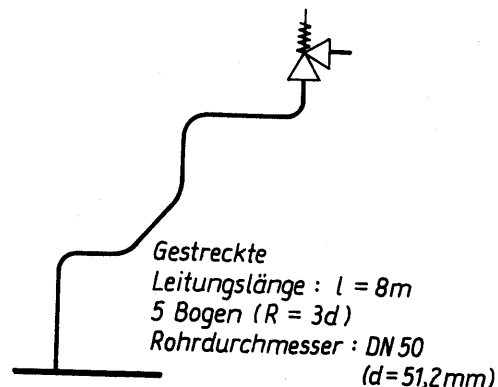
Aus /8, S. 265/ kann für  $t = 60 \text{ °C}$ ;  $\dot{m}_w = 5,2 \text{ kg/s}$ ;  $d = 51,2 \text{ mm}$  abgelesen werden:  
 $R = 1303 \text{ Pa}$ ;  $w = 2,6 \text{ m/s}$ ;  $S = 3243 \text{ Pa}$ .

Die Summe der Einzelwiderstandsbeiwerte ergibt sich nach /8, S. 469 u.f./ zu:

|              |             |
|--------------|-------------|
| Einlauf      | $\xi = 0,5$ |
| 5 Bogen      | $\xi = 1,0$ |
| <hr/>        |             |
| $\Sigma \xi$ | $= 1,5$     |

Damit berechnet sich der Gesamtdruckverlust der Zuleitung nach Gl. (5.3):

$$\Delta p_{Zu} = (1303 \cdot 8 + 3243 \cdot 1,5) \text{ Pa} = 15289 \text{ Pa}.$$



**Bild 5.6** Geometrische Gegebenheiten der im Beispiel 1 betrachteten Zuleitung

Der zulässige Druckverlust gemäß Gl. (5.1) beträgt:

$$\Delta p_{Zu, zul} = 0,03 \cdot (0,65 - 0,1) \text{ MPa} = 16500 \text{ Pa.}$$

Die angenommene Zuleitung entspricht somit den Forderungen.

### Beispiel 2 (Sattdampfströmung)

Ein Sattdampfstrom  $\dot{m}_{WD} = 2 \text{ kg/s}$  ist einem Vollhubsicherheitsventil mit dem Ansprechdruck von  $p_A = 1,3 \text{ MPa}$  über die im Bild 5.7 dargestellte Leitung zuzuführen. Es ist zu prüfen, ob die in Gl. (5.1) vorgegebene Bedingung erfüllt wird.

### Lösung

Es gelten zugehörig zum Sattdampfdruck  $p_A = 1,3 \text{ MPa}$  gemäß Wasserdampf tabel /30, 33/ oder /7/:

$$t_S = 192 \text{ °C}; \quad v'' = 0,15 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad \eta'' = 15,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m s)}.$$

Die Einzelwiderstandsbeiwerte ergeben sich nach /8, S. 469 u.f./ zu:

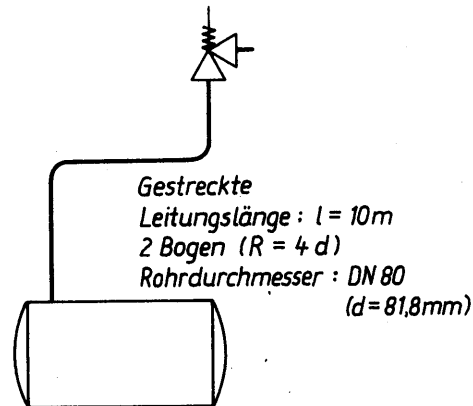
$$\begin{array}{ll} \text{Einlauf} & \xi = 0,5 \\ 2 \text{ Bogen} & \xi = 0,32 \end{array}$$

$$\Sigma \xi = 0,82.$$

Zur Berechnung des Rohrreibungsbeiwertes  $\lambda$  sind einige Zwischenschritte erforderlich:

Gl. (5.5)

$$Re = \frac{4 \cdot 2}{15,5 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 0,0818} = 2 \cdot 10^6$$



**Bild 5.7** Geometrische Gegebenheiten der im Beispiel 2 betrachteten Zuleitung

Relative Rohrrauigkeit ( $\epsilon = 0,05 \text{ mm}$ )

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0,05}{81,8} = 0,0006.$$

Rohrreibungsbeiwert aus Bild 5.4

$$\lambda = 0,017.$$

Die Geschwindigkeit beträgt nach Gl. (5.4)

$$w = \frac{4 \cdot 2 \cdot 0,15}{\pi \cdot 0,0818^2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 57,1 \text{ m/s}.$$

Gemäß Gl. (5.3) ergibt sich der Druckverlust der Zuleitung

$$\Delta p_{Zu} = \left( 0,017 \cdot \frac{10}{0,0818} + 0,82 \right) \cdot \frac{57,1^2}{2 \cdot 0,15} \text{ Pa} = 31498 \text{ Pa}.$$

Der zulässige Wert folgt aus Gl. (5.1) zu

$$\Delta p_{Zu, zul} \leq 0,03 \cdot (1,3 - 0,1) \text{ MPa} = 36000 \text{ Pa}.$$

Damit ist die vorgegebene Bedingung erfüllt.

### Beispiel 3 (Naßdampfströmung)

Der Druckverlust in der Zuleitung (ND 100;  $d = 100 \text{ mm}$ ;  $l = 15 \text{ m}$ ;  $\Sigma \xi = 1,5$ ) eines Sicherheitsventils, das mit Naßdampf ( $x_{WD} = 0,037$ ;  $\dot{m}_{ND} = 5,94 \text{ kg/s}$ ;  $p_A = 0,85 \text{ MPa}$ ) beaufschlagt wird, ist zu berechnen.

### Lösung

Es gelten die Zustands- und Stoffwerte:

Flüssigphase

Gasphase

$$v_f \equiv v' = 0,001182 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g \equiv v'' = 0,22687 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\eta_f \equiv \eta' = 155,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(s m)}$$

$$\eta_g \equiv \eta'' = 14,82 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(s m)}.$$

Damit folgen die fiktiven Geschwindigkeiten der Einzelphasen - sie füllen jeweils den Gesamtquerschnitt aus - und die zugehörigen REYNOLDS-Zahlen gemäß den Gln. (5.4) und (5.5):

$$w_f = \frac{4 \cdot 5,94 \cdot (1 - 0,037) \cdot 0,001182}{\pi \cdot 0,1^2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,81 \text{ m/s}$$

$$Re_f = \frac{0,81 \cdot 0,1}{155,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0011182} = 4,6 \cdot 10^5$$

$$w_g = \frac{4 \cdot 5,94 \cdot 0,037 \cdot 0,22687}{\pi \cdot 0,1^2} \frac{m}{s} = 6,35 \text{ m/s}$$

$$Re_g = \frac{6,35 \cdot 0,1}{14,82 \cdot 10^{-6} \cdot 0,22687} = 1,9 \cdot 10^5$$

Mit der Rohrrauigkeit  $\epsilon = 0,05 \text{ mm}$  ergibt sich

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0,05}{100} = 0,0005,$$

womit aus Bild 5.4 die Rohrreibungsbeiwerte der Einzelphasen zu entnehmen sind:

$$\lambda_f = 0,018; \quad \lambda_g = 0,019.$$

Nach Gl. (5.3) ergeben sich die Druckverluste:

$$\Delta p_f = \left( 0,018 \cdot \frac{15}{0,1} + 1,5 \right) \cdot \frac{0,81^2}{2 \cdot 0,0011182} \text{ Pa} = 1232 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_g = \left( 0,019 \cdot \frac{15}{0,1} + 1,5 \right) \cdot \frac{6,35^2}{2 \cdot 0,22687} \text{ Pa} = 387 \text{ Pa}.$$

Mit diesen Werten berechnet sich gemäß Gl. (5.6) der LOCKHART-MARTINELLI-Parameter

$$X_{LM} = \sqrt{\frac{1232}{387}} = 1,78,$$

womit Bild 5.5 den Korrekturfaktor

$$\Phi_f = 3,2$$

liefert. Gl. (5.7) ergibt den endgültigen Druckverlust der Zweiphasenströmung in der Zuleitung

$$\Delta p_{Z,Zu} = 3,2^2 \cdot 1232 = 12616 \text{ Pa}.$$

Dieser Wert ist bedeutend kleiner als der zulässige Druckverlust nach Gl. (5.1)

$$\Delta p_{Zu,zul} = 0,03 \cdot (0,85 - 0,1) \text{ MPa} = 22500 \text{ Pa}.$$

Interessehalber sei die Geschwindigkeit des Zweiphasengemisches bestimmt. Sie beträgt nach Auswerten der Gl. (5.4a)

$$w = (6,35 + 0,81) \frac{m}{s} = 7,16 \text{ m/s}.$$

## 5.3. Bemessung der Abblaseleitung

### 5.3.1. Zulässiger Gegendruck

Die gesetzlichen Vorschriften /17, 20/ führen allgemein aus, daß die in der Abblaseleitung auftretenden Gegendrucke den vom Sicherheitsventil abzuleitenden Mengenstrom nicht beeinflussen dürfen bzw. daß die tatsächlich vorhandenen Gegendrucke bei der Ventilbemessung zu berücksichtigen sind.

Der **Gegendruck**  $p_G$ , der auf der Austrittsseite des Sicherheitsventils während des Abblasens ansteht, kann durch zwei unterschiedliche Ursachen hervorgerufen werden:

I. **Druckänderung** (Druckverlust) in der Abblaseleitung infolge Rohrreibung und Einzelwiderstände  $\Longrightarrow$  **Eigengegendruck**  $p_{EG}$

II. **Statischer Druck** am Ende der Abblaseleitung  $\Longrightarrow$  **Fremdgegendruck**  $p_{FG}$ .

Bei einem freien Austritt entspricht dieser dem Atmosphärendruck, bei der Ableitung in ein geschlossenes System dem dort herrschenden statischen Druck. Der Fremdgegendruck kann wiederum konstant sein oder systembedingt schwanken, so beispielsweise, wenn mehrere Sicherheitsventile in das gleiche Auffangsystem abblasen. Man spricht deshalb vom **konstanten** bzw. **variablen** Fremdgegendruck  $p_{FG,k}$  und  $p_{FG,v}$ .

Die Quantifizierung der zugelassenen Gegendrucke sind den Herstellerunterlagen bzw. den Zulassungsurkunden zu entnehmen. Die Angaben beziehen sich in der Regel auf Überdrücke, so daß bei Verwenden der Absolutwerte gelten:

**Eigengegendruck**

$$p_{EG,zul} \leq g_{EG}(p_A - 0,1 \text{ MPa}) + 0,1 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

**variabler Fremdgegendruck**

$$p_{FG,v,zul} \leq g_{FG,v}(p_A - 0,1 \text{ MPa}) + 0,1 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

**konstanter Fremdgegendruck**

$$p_{FG,k,zul} \leq g_{FG,k}(p_A - 0,1 \text{ MPa}) + 0,1 \text{ MPa}. \quad (5.10)$$

Die Koeffizienten  $g$  lauten beispielsweise für die im Bild 4.8 vorgestellten Sicherheitsventile ( $p_A > 0,2 \text{ MPa}$ ) beim Auftreten von nur einer Gegendruckkomponente nach /21/:

| Faktor     | Medium      | V<br>Si 61/63 | V, FB<br>Si 61/63 | P<br>Si 25 | P, FB<br>Si 25 |
|------------|-------------|---------------|-------------------|------------|----------------|
| $g_{EG}$   | Gas/Dampf   | 0,15          | 0,50              | 0,15       | 0,50           |
|            | Flüssigkeit | -             | 0,50              | -          | 0,50           |
| $g_{FG,v}$ | Gas/Dampf   | 0,05          | 0,50              | -          | 0,50           |
|            | Flüssigkeit | -             | -                 | -          | -              |
| $g_{FG,k}$ | Gas/Dampf   | 0,50          | 0,50              | 0,50       | 0,50           |
|            | Flüssigkeit | 0,90          | 0,90              | 0,90       | 0,90           |

V Vollhubsicherheitsventil; P Proportional Sicherheitsventil; FB Faltenbalg

#### Anmerkung

- Bei Fremdgedrücken sind grundsätzlich Sicherheitsventile mit geschlossener Federhaube einzusetzen.
- Treten konstante Fremdgedrücke auf, so erfolgt die Auswahl und Einstellung der Ventildfeder für den Differenzdruck ( $p_A - p_{FG,k}$ ). Man bezeichnet diese Druckdifferenz auch als Einstelldruck.
- Bei variablem Fremdgedruck sind entweder nur sehr kleine Werte zugelassen oder es sind Ventile mit Faltenbalg einzusetzen.

Bei einer **Überlagerung** von **Eigen-** und **Fremdgedrücken** wird empfohlen, die Koeffizienten für variablen Fremdgedruck zu verwenden:

$$p_{G,zul} \leq g_{FG,v} (p_A - 0,1 \text{ MPa}) + 0,1 \text{ MPa}. \quad (5.11)$$

### 5.3.2. Nachweis des Gegendruckes

Die erforderliche Nachweisführung sowie die Berechnungsart sind vom abzublasenden Medium sowie vom eingesetzten Abblasesystem abhängig und bedürfen somit einer detaillierten Betrachtung.

#### Grundsätze

- Wasser** ( $t \leq 115 \text{ °C}$ ) kann senkrecht nach unten über ein Wasser-Fallrohr WF sichtbar ins **Freie** oder über eine Abblaseleitung Ab in ein **geschlossenes System** mit dem Fremdgedruck  $p_{FG}$  geleitet werden.

- Wasserdampf (Satttdampf, Heißdampf)** oder **Gas (Luft, Stickstoff)** sollte senkrecht nach oben über eine Abblaseleitung Ab ins **Freie** oder in ein **geschlossenes System** geführt werden. Im ersten Fall ist die Abblaseleitung zu entwässern, im zweiten Fall mit Gefälle zum Auffangsystem zu verlegen.

- Heißwasser** ( $t > 115 \text{ °C}$ ) und **Naßdampf** ( $0 < x_{WD} < 1$ ) erfahren bei der Entspannung im Sicherheitsventil bzw. an dessen Austritt einen Phasenwandel mit Zunahme des Wasserdampfgehaltes  $x_{WD}$ .

Der Zustandsverlauf der möglicherweise mehrstufigen Entspannung, beeinflusst von eventueller Flüssigkeitsunterkühlung und überlagertem Gegendruck, ist theoretisch noch nicht exakt beschreibbar und bisher unzureichend experimentell überprüft. Es werden deshalb vorläufig folgende Empfehlungen gegeben:

- Das Wasser-Dampf-Gemisch sollte ohne Fremdgedruck, d.h. ins Freie, abblasen.
- Der Sicherheitsventilaustritt ist über eine möglichst kurze, mit Gefälle verlegte Abblaseleitung Ab an ein Trenngefäß TG anzuschließen.
- Der separierte Wasserdampf sollte über ein Dampf-Abblaserohr DA über Dach und das Wasser über ein Wasser-Fallrohr WF in ein Kühlbecken oder Mischgefäß geleitet werden.
- Einen konstruktiven Vorschlag zur Ausbildung des Trenngefäßes (Entspannungstopfes) einschließlich Rohranschlüssen zeigt Bild 5.8.  
Um einen Austritt von Dampf über das nach unten geführte Wasser-Fallrohr zu vermeiden, ist im Auffangbehälter eine Wasservorlage der Höhe  $h_{wv}$  vorzusehen.
- Das Abblasen von Heißwasser in ein geschlossenes System ist nur nach speziellem Eignungsnachweis des Sicherheitsventil-Abblasesystems zulässig. Zweckmäßigerweise sind Sicherheitsüberströmventile oder evtl. Stellventile vorzusehen.

- Verschiedenartige Lastfälle** können das **Abblasesystem** mit unterschiedlichen Medien beaufschlagen. Die Kombinationen, die unter anderem Heißwasser oder/und Naßdampf enthalten, erfordern den Einsatz eines Trenngefäßes und das Abblasen ins Freie. Das gleiche Abblasesystem sollte für eine wechselweise Beaufschlagung von Wasser und Wasserdampf oder/und Gas gewählt werden, da nur durch die Anordnung eines Trenngefäßes den sonst geltenden Einzelforderungen entsprochen werden kann.

- Für die **Maximalgeschwindigkeiten** im Abblasesystem gelten folgende Empfehlungen:

|                   |            |
|-------------------|------------|
| Wasser-Fallrohr   | < 1 m/s    |
| Dampf-Abblaserohr | < 100 m/s  |
| Abblaseleitung    |            |
| Wasser            | < 3 m/s    |
| Gas/Dampf         | < 250 m/s. |

Die genannten Grenzwerte schließen bei kompressiblen Medien Schallgeschwindigkeit am Rohraustritt aus, begrenzen bei inkompressiblen Fluiden die Druckstöße und erübrigen beim Wasser-Fallrohr eine hydraulische Nachrechnung.

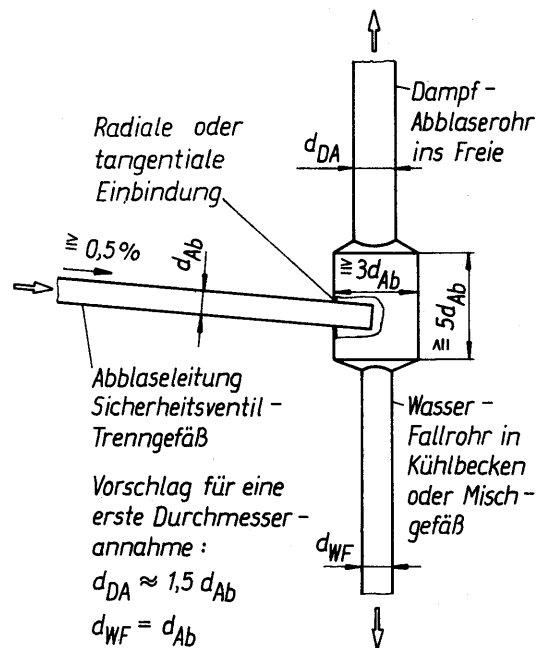


Bild 5.8 Vorschlag für die konstruktive Ausbildung eines Trenngefäßes mit Rohranschlüssen

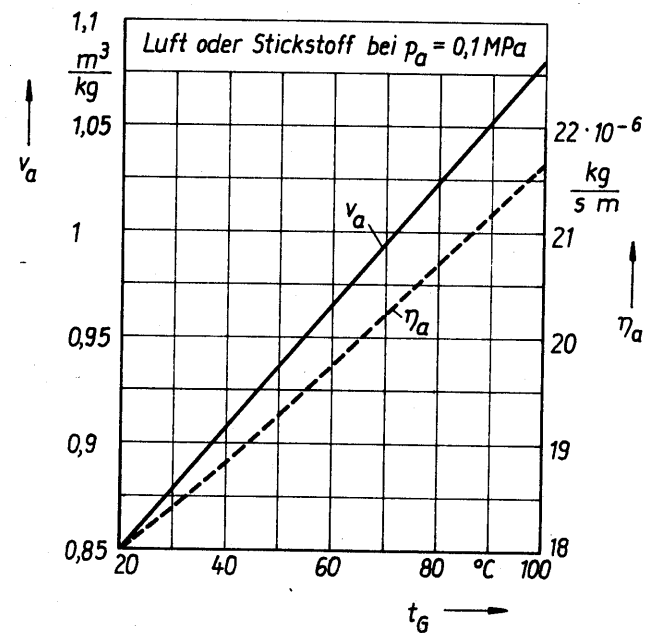
- Bei der Entspannung des idealen Gases bleibt die Temperatur  $t$  konstant. Deshalb sind die Zustands- und Stoffwerte der realen Gase Luft und Stickstoff näherungsweise für den Fremdgedruck  $p_{FG}$  und die Temperatur  $t$ , die der Stoffstrom vor dem Sicherheitsventil hat, zu bilden.

Bei Abblasen von Wasserdampf ist von der Konstanz der Enthalpie  $h$  auszugehen. Für den entstehenden überhitzten Dampf kann somit die zu  $p_{FG}$  und  $h$  gehörige Überhitzungstemperatur  $t$  aus der Wasserdampf-tafel - z.B. /33/ - entnommen werden. Die für die Druckverlustermittlung relevanten Zustands- und Stoffwerte  $v$  und  $\eta$  sind dann ohne weiteres bestimmbar.

Für den häufigsten Einsatzfall - Abblasen ins Freie - , d.h. Entspannung auf  $p_a = 0,1$  MPa folgen die genannten Größen sofort aus Bild 5.9. Sie sind bei Abblasesystemen mit Trenngefäß für das Dampf-Abblaserohr und näherungsweise auch für die Abblaseleitung bei  $p_{TG}$  gültig.

Für geschlossene Systeme mit Fremdgedruck können die Angaben in Bild 5.9 nach den dort vermerkten Formeln auf den Druck  $p_{FG}$  umgerechnet werden.

- Eine zusammenfassende Übersicht der Ausführungsformen zeigt Tabelle 5.1.



Umrechnung der Diagrammwerte auf den Druck  $p_{FG}$  in MPa:

$$v_{FG} = v_a \frac{0,1}{p_{FG}}$$

$$\eta_{FG} \approx \eta_a$$

Formeln gelten näherungsweise auch für Wasserdampf!

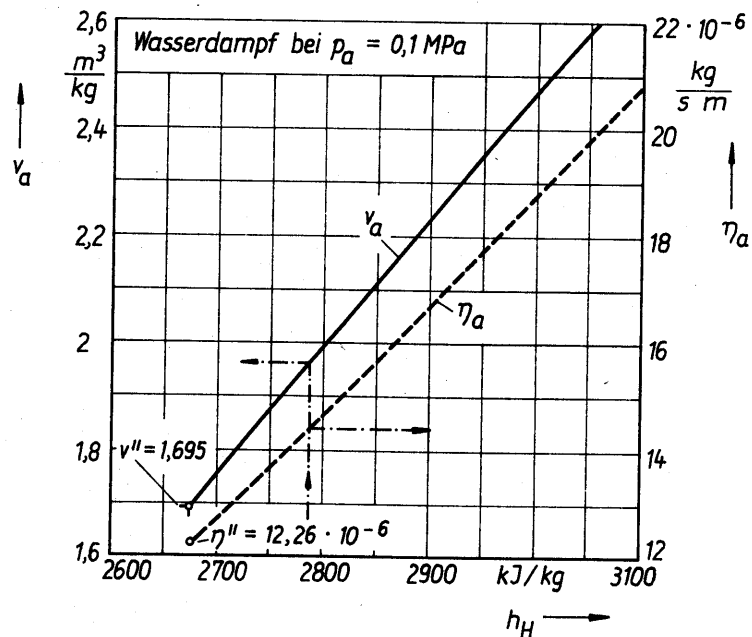
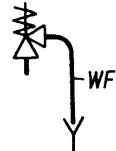
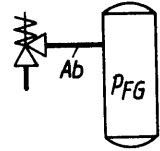
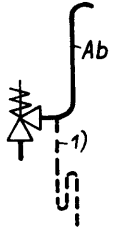
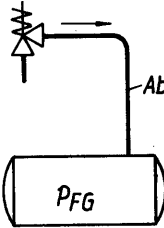
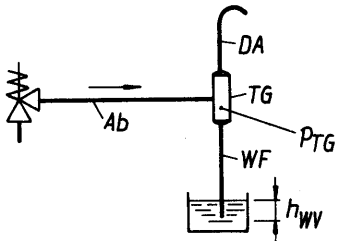


Bild 5.9 Spezifische Volumina  $v_a$  und dynamische Viskositäten  $\eta_a$  bei Atmosphärendruck  $p_a = 0,1$  MPa nach einer Entspannung im Sicherheitsventil in Abhängigkeit der Gastemperatur  $t_G$  oder der spezifischen Enthalpie  $h_H$  vor dem Ventil im Ansprechfall Eine näherungsweise Umrechnung auf einen über  $p_a$  liegenden Fremdgedruck  $p_{FG}$  ist angegeben.

Tabelle 5.1 Abblasesystem und Zuordnung des Abblasemediums

| Abblasesystem                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Zulässiges Abblasemedium |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <b>SYS=1</b><br/>  </div> <div> <b>SYS=2</b><br/>  </div> </div> | <b>Einzelbeaufschlagung des Abblasesystems</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Wasser (<math>t \leq 115 \text{ °C}</math>)</li> <li>Heißwasser (<math>115 \text{ °C} &lt; t &lt; t_{s(P_{FG})}</math>)<br/>in geschlossenes System nur bei SV-Eignungsnachweis zulässig!</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                      |                          |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <b>SYS=3</b><br/>  </div> <div> <b>SYS=4</b><br/>  </div> </div> | <b>Einzelbeaufschlagung des Abblasesystems</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Wasserdampf (Sattdampf, Heißdampf)</li> <li>Gas (Luft, Stickstoff)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |
| <b>SYS=5</b><br>                                                                                                                                                                                                   | <b>Einzelbeaufschlagung des Abblasesystems</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Heißwasser (<math>t &gt; 115 \text{ °C}</math>)</li> <li>Naßdampf (Siedewasser-Sattdampf-Gemisch)</li> </ul> <b>Kombinierte Beaufschlagung des Abblasesystems</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Heißwasser + Wasser</li> <li>Heißwasser + Naßdampf</li> <li>Heißwasser + Wasserdampf</li> <li>Heißwasser + Gas</li> <li>Naßdampf + Wasser</li> <li>Naßdampf + Wasserdampf</li> <li>Naßdampf + Gas</li> <li>Wasser + Wasserdampf</li> <li>Wasser + Gas</li> </ul> |                          |

**Erklärung:**

|          |                      |
|----------|----------------------|
| Ab       | Abblaseleitung       |
| DA       | Dampf-Abblaserohr    |
| WF       | Wasser-Fallrohr      |
| TG       | Trenngefäß           |
| $h_{WV}$ | Höhe (Wasservorlage) |

SYS - Kennzeichnung des Abblasesystems für die automatisierte Abarbeitung im Abschnitt 5.4.

- 1) Die Durchmesser der Entwässerungen sind in Abhängigkeit der Lastfälle, des Kondensatanfalls und der Anzahl der Entwässerungen nach ingenieurmäßigen Gesichtspunkten festzulegen.

**Abblasen von Flüssigkeiten (Wasser mit  $t \leq 115 \text{ °C}$ )**

Gemäß den Gln. (4.11) und (4.12) bildet die Druckdifferenz  $(p_1 - p_2) = (p_A - p_G)$  die Bemessungsgrundlage. Der maximale Gegendruck ist somit vor der Querschnittsermittlung des Sicherheitsventils zu berechnen.

Wird die **Abblaseleitung** Ab in ein **geschlossenes System** mit dem maximalen Fremdgedruck  $p_{FG}$  geführt, so ergibt sich mit dem Druckverlust der Abblaseleitung  $\Delta p_{Ab}$  der anzusetzende Gegendruck zu

$$p_G = p_{FG} + \Delta p_{Ab} \quad (5.12)$$

Die Druckverlustermittlung ist entsprechend den Gln. (5.3) bis (5.5) vorzunehmen.

Bei Abblasen des Wasserstromes über ein senkrecht nach unten geführtes **Wasser-Fallrohr** ins Freie gilt

$$p_G = p_a = 0,1 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

Diese Beziehung kann auch bei völlig ausgefülltem Rohrquerschnitt (Druckrohrströmung) beibehalten werden, da bei üblicher Durchmesserwahl ( $w < 1 \text{ m/s}$ ) die Rohrreibung kleiner als die Druckhöhe der senkrechten Flüssigkeitssäule ist.

Soll der Wasserstrom über ein **Abblasesystem mit Trenngefäß** ins Freie geführt werden, so folgt in Analogie zu den Gln. (5.12) und (5.13) der Gegendruck

$$p_G = p_{TG} + \Delta p_{Ab} \quad (5.14)$$

mit dem Druck im Trenngefäß

$$p_{TG} = 0,1 \text{ MPa} \quad (5.15)$$

**Fazit**

Bei Flüssigkeitsströmung bedürfen Wasser-Fallrohre nicht der Nachrechnung ( $w < 1 \text{ m/s}$ ). Der auftretende Druckverlust in Abblaseleitungen ist bereits bei der Ventilbemessung zu berücksichtigen.

Auch wenn hohe Gegendrucke zugelassen sind, sollte der durchsatzabhängige Druckverlust  $\Delta p_{Ab}$  möglichst gering sein, um kleine Sicherheitsventil-Querschnitte zu erhalten und um die ausflußbedingten Gegendruckschwankungen zu minimieren.

Die spezielle Ventileignung nach Gln. (5.8) bis (5.11) ist zu überprüfen.

**Abblasen von Gasen (Luft, Stickstoff) und Dämpfen (Sattdampf, Heißdampf)**

Zur Auswertung der Gln. (4.25) und (4.26) muß die Ausflußfunktion  $\psi$  bekannt sein, die das Druckverhältnis  $\pi = p_G/p_A$  nach Gl. (4.51) beinhaltet.

Solange  $\pi$  im überkritischen Bereich liegt, für ihn gilt näherungsweise  $\pi < 0,5$ , bewirkt eine Erhöhung des Gegendruckes theoretisch keine Reduzierung des Abblasesstromes. In praxi sinken die Ausflußziffern  $\alpha$  der Sicherheitsventile jedoch schon für  $\pi > 0,25$ , wie Bild 4.8 ausweist. Das heißt, um einen wirtschaftlichen Ventileinsatz

zu sichern, sollten die Gegendrücke  $p_G$  unter diesen Grenzwerten, die zu einer Leistungsminderung führen, liegen.

Weitere Festlegungen gelten typ- und einsatzspezifisch gemäß den Gl. (5.8) bis (5.11).

Bei Abblasen in ein **geschlossenes System** mit dem maximalen Fremdgedruck  $p_{FG}$  ist die Druckänderung in der **Abblaseleitung** Ab vor der Querschnittsermittlung des Sicherheitsventils zu berechnen. Die Eigenschaften der kompressiblen Medien beachtend, kann analog /8, S. 143/ ausgehend von  $p_{FG}$  der Gegendruck  $p_G$  am Anfang der Abblaseleitung ermittelt werden. Mit den Vereinfachungen - isothermer Zustandsverlauf, konstante kinetische Energie - folgt

$$p_G = \sqrt{p_{FG}^2 + \left( \lambda \frac{1}{d} + \sum \xi \right) \frac{w_{FG}^2}{v_{FG}} p_{FG}} \quad (5.16)$$

wobei die Gl. (5.4) und (5.5), Bild 5.4 und die im Abschnitt 5.2.2. enthaltene Le-gende weiterhin gelten. Der Index FG nimmt auf den Fremdgedruck Bezug und kenn-zeichnet den Zustand am Austritt der Abblaseleitung Ab. Zur Bestimmung der Zustands- und Stoffwerte bei  $p_{FG}$  ist Bild 5.9 hilfreich.

Ermittelt man den Druckverlust  $\Delta p_{Ab,FG}$  nach dem für inkompressible Fluide gültigen Verfahren (Gl. (5.3)) mit den geometrischen Größen der Abblaseleitung und den zu  $p_{FG}$  zugehörigen Zustands- und Stoffwerten, so erhält Gl. (5.16) die Form

$$p_G = \sqrt{p_{FG}^2 + 2 \Delta p_{Ab,FG} p_{FG}} \quad (5.17)$$

An Hand der Gl. (5.11) ist die Zulässigkeit des Gegendruckes zu überprüfen.

Mündet die **Abblaseleitung** Ab ins **Freie**, gilt die vorgenannte Berechnungsmethode nach Substitution von  $p_{FG} = p_a = 0,1 \text{ MPa}$  weiterhin:

$$p_G = \sqrt{p_a^2 + 2 \Delta p_{Ab,a} p_a} \quad (5.18)$$

Der zulässige Eigengedruck berechnet sich nach Gl. (5.8).

Wird der Gas- bzw. Wasserdampfstrom über ein **Abblasesystem mit Trenngefäß** ins **Freie** geführt, so ist in Analogie zum Vorgenannten schrittweise vorzugehen. Mit den geome-trischen Daten des Dampf-Abblaserohres DA sowie dem Enddruck  $p_a$ , der als Bezugswert für die Zustands- und Stoffwerte gilt, folgen die Ermittlung von  $\Delta p_{DA,a}$  (Gl. (5.3)) und der Druck im Trenngefäß.

$$p_{TG} = \sqrt{p_a^2 + 2 \Delta p_{DA,a} p_a} \quad (5.19)$$

Unter Bezugnahme auf die Geometrie der Abblaseleitung Ab sowie  $p_{TG}$  berechnet sich mit  $\Delta p_{Ab,TG} \approx \Delta p_{Ab,a}$  der Gegendruck

$$p_G = \sqrt{p_{TG}^2 + 2 \Delta p_{Ab,TG} p_{TG}} \quad (5.20)$$

Der zulässige Eigengedruck nach Gl. (5.8) ist  $p_G$  gegenüberzustellen. Um ein Aus-treten von Gas oder Wasserdampf über das Wasser-Fallrohr zu vermeiden, muß die Höhe der Wasservorlage

$$h_{wv} = \frac{p_{TG} - p_a}{\rho_w g} = \frac{v_w}{g} (p_{TG} - p_a) \quad (5.21)$$

betragen. Dabei stellt  $\rho_w = 1/v_w$  die Dichte des Wassers dar.

### Fazit

Der Gegendruck des Abblasesystems für Gase und Dämpfe ist zu ermitteln und bei der **Bemessung des Sicherheitsventils** zu berücksichtigen.

Ist bei der Ventilauswahl von Maximalwerten für die Ausflußfunktion und Ausflußziffer ausgegangen worden, so muß eine Nachrechnung bzw. -bemessung des Abblasesystems - mit dem Ziel, das angenommene Verhältnis  $p_G/p_a$  nicht zu überschreiten - erfolgen. Die spezielle Ventileignung nach Gl. (5.8) bis (5.11) ist zu überprüfen.

### Abblasen von Heißwasser und Naßdampf

Das aus dem Sicherheitsventil austretende Wasser-Dampf-Gemisch ist über ein **Abblase-system mit Trenngefäß** ins **Freie** abzuleiten. Zur Berechnung des Gegendruckes am Sicherheitsventilaustritt wird in folgenden Schritten vorgegangen:

- Ermittlung des Wasserdampfgehaltes bei Entspannung auf Atmosphärendruck nach den Gl. (4.34a) oder (4.34b)

$$x_{WD} = \frac{h_1 - 418}{2258} \quad (5.22)$$

mit  $h_1$  in kJ/kg der spezifischen Enthalpie des Heißwassers oder des Naßdampfes vor dem Sicherheitsventil.

- Aufteilung des Abblasesstromes  $\dot{m}$  in:  
Siedewasserstrom

$$\dot{m}_W = \dot{m} (1 - x_{WD}) \quad (5.23)$$

Sattdampfstrom

$$\dot{m}_D = \dot{m} x_{WD} \quad (5.24)$$

- Ausgehend vom Atmosphärendruck  $p_a$  am Austritt des **Dampf-Abblaserohres** DA wird unter Verwendung der zugehörigen Zustands- und Stoffwerte  $v_a = v'' = 1,695 \text{ m}^3/\text{kg}$  und  $\eta_a = \eta'' = 12,26 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s m})$  sowie der geometrischen Daten des Abblaserohres näherungsweise der Druck im Trenngefäß

$$p_{TG} = \sqrt{p_a^2 + 2 \Delta p_{DA,a} p_a} \quad (5.25)$$

bestimmt. Die Gl. (5.3) bis (5.5) – einschließlich der Legende – sowie Bild 5.4 gelten beim Einsetzen der für das Dampf-Abblaserrohr zutreffenden Größen zur Berechnung von  $\Delta p_{DA,a}$  uneingeschränkt.

- Bemessung des **Wasser-Fallrohres** unter Annahme einer Druckrohrströmung für  $\dot{m}_W$  und einer Geschwindigkeit  $w < 1$  m/s sowie Ermittlung der Höhe  $h_{WV}$  für die Wasservorlage im Kühl- oder Mischgefäß gemäß Gl. (5.21).
- Berechnung des Druckverlustes  $\Delta p_{Z,Ab}$  in der **Abblaseleitung** Ab vom Sicherheitsventil zum Trenngefäß unter Annahme einer Zweiphasenströmung nach dem zugehörig zu den Gl. (5.6) und (5.7) beschriebenen Verfahrensweg. Für die Gasphase gelten die vorgenannten Größen  $v''$  und  $\eta''$ , für die Flüssigphase sind  $v' = 0,0010434$  m<sup>3</sup>/kg und  $\eta' = 283,3 \cdot 10^{-6}$  kg/(s m) zu verwenden.
- Der für das Sicherheitsventil relevante Gegendruck ergibt sich näherungsweise zu
 
$$p_G = \Delta p_{Z,Ab} + p_{TG} \quad (5.26)$$
- Die mittlere Geschwindigkeit des Zweiphasengemischs im Rohr berechnet sich nach Gl. (5.4a).

#### Fazit

Der Gegendruck des Abblasesystems für Heißwasser und Naßdampf ist nachzurechnen und dem zulässigen Wert gemäß Gl. (5.8) gegenüberzustellen. Er sollte gemäß Abschnitt 4.2.4. weit unterhalb des kritischen Druckes, d.h. nur gering über dem Atmosphärendruck liegen.

### 5.3.3. Beispiele

#### Beispiel 1 (Wasserabströmung)

Der von einem Sicherheitsventil abgespeiste Wasserstrom ( $\dot{m}_W = 5,2$  kg/s;  $t = 60$  °C) wird über eine Rohrleitung (DN 50;  $d = 51,2$  mm;  $l = 2,5$  m;  $\Sigma \zeta = 2$ ) in einen Behälter mit dem konstanten Fremdgedruck  $p_{FG} = 0,29$  MPa geführt.

Der am Sicherheitsventilaustritt anstehende Gesamtgedruck ist zu berechnen.

#### Lösung

Aus /8, S. 265/ folgen für  $t = 60$  °C;  $\dot{m}_W = 5,2$  kg/s;  $d = 51,2$  mm die Werte:

$$R = 1303 \text{ Pa}; \quad w = 2,6 \text{ m/s}; \quad S = 3243 \text{ Pa}.$$

Nach Gl. (5.3) ergibt sich der Gesamtdruckverlust der Abblaseleitung zu

$$\Delta p_{Ab} = (1303 \cdot 2,5 + 3243 \cdot 2) \text{ Pa} = 0,0097 \text{ MPa}.$$

Der Gegendruck berechnet sich damit gemäß Gl. (5.12):

$$p_G = (0,29 + 0,0097) \text{ MPa} \approx 0,3 \text{ MPa}.$$

#### Beispiel 2 (Sattdampfströmung)

Von einem Vollhubsicherheitsventil werden  $\dot{m}_{WD} = 2$  kg/s Sattdampf bei einem Ansprechdruck  $p_A = 1,3$  MPa über eine Rohrleitung (DN 150;  $d = 150$  mm;  $\epsilon = 0,1$  mm;  $l = 10$  m;  $\Sigma \zeta = 2,4$ ) ins Freie abgeblasen. Der am Ventilaustritt vorhandene Gegendruck ist zu ermitteln und mit dem zulässigen Wert zu vergleichen, wenn das Ventil bis zu einem Eigengegendruck von 15 % funktionstüchtig arbeitet.

#### Lösung

Die spezifische Enthalpie des Sattdampfes beträgt nach Wassertafel /30, 33/ oder Gl. (A7)

$$h_g = h'' = 2786,1 \text{ kJ/kg}.$$

Bei Entspannung auf Atmosphärendruck  $p_a$  bleibt bei Vernachlässigung des Wärmeaustausches und der Änderung des kinetischen Energieanteils die Enthalpie konstant. Aus der Wasserdampftafel /33/ folgen für  $p = 0,1$  MPa und  $h_H = h_g$  die Dampftemperatur  $t_H = 155$  °C, das spezifische Volumen  $v_H = 1,961$  m<sup>3</sup>/kg und die dynamische Viskosität  $\eta = 14,39 \cdot 10^{-6}$  kg/(s m). Diese Werte hätte man auch sofort aus Bild 5.9 ablesen können.

Die weiteren Berechnungsschritte lauten:

Austrittsgeschwindigkeit nach Gl. (5.4)

$$w = \frac{4 \cdot 2 \cdot 1,961}{\pi \cdot 0,150^2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 222 \text{ m/s}$$

REYNOLDS-Zahl nach Gl. (5.5)

$$Re = \frac{222 \cdot 0,150}{14,39 \cdot 10^{-6} \cdot 1,961} = 1,2 \cdot 10^6$$

Relative Rauigkeit

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0,1}{150} = 0,0007$$

Rohrreibungsbeiwert nach Bild 5.4

$$\lambda = 0,018$$

Druckverlust nach Gl. (5.3)

$$\Delta p_{Ab,a} = \left( 0,018 \frac{10}{0,150} + 2,4 \right) \cdot \frac{222^2}{2 \cdot 1,961} \text{ Pa} = 45238 \text{ Pa}$$

Gegendruck nach Gl. (5.18)

$$p_G = \sqrt{0,1^2 + 2 \cdot 45238 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \text{ MPa} = 0,14 \text{ MPa}.$$

Der zulässige Gegendruck berechnet sich nach Gl. (5.8)

$$p_{G,zul} \leq 0,15 \cdot (1,3 - 0,1) \text{ MPa} + 0,1 \text{ MPa} = 0,28 \text{ MPa}.$$

Damit ist die gewählte Abblaseleitung einsetzbar.

### Beispiel 3 (Naßdampfabströmung)

Über ein Sicherheitsventil mit dem Ansprechdruck  $p_A = 0,85 \text{ MPa}$  wird der Naßdampfstrom  $\dot{m}_{ND} = 5,94 \text{ kg/s}$ ,  $x_{WD} = 0,037$  in das im Bild 5.10 dargestellte Abblasesystem geleitet. Es ist zu überprüfen, ob der zulässige Eigengendruck von 15 % eingehalten wird.

### Lösung

Die spezifische Enthalpie vor dem Sicherheitsventil  $h_1$  beträgt mit dem zum Druck  $p_1 = p_A = 0,85 \text{ MPa}$  gehörigen Werten  $h'_1 = 732,0 \text{ kJ/kg}$  und  $h''_1 = 2770,8 \text{ kJ/kg}$

$$h_1 = h'_1 + x_{WD,1} (h''_1 - h'_1) = [732,0 + 0,037 \cdot (2770,8 - 732,0)] \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 807,4 \text{ kJ/kg}.$$

Für die Zustands- und Stoffwerte bei Atmosphärendruck gelten:

$$v' = 0,0010434 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad v'' = 1,6946 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\eta' = 283,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(s m)}; \quad \eta'' = 12,26 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(s m)}.$$

Weiterhin ergeben sich für das **Dampf-Abblaserohr**:

Dampfgehalt bei Entspannung auf Atmosphärendruck nach Gl. (5.22)

$$x_{WD} = \frac{807,4 - 418}{2258} = 0,172$$

Siedewasserstrom nach Gl. (5.23)

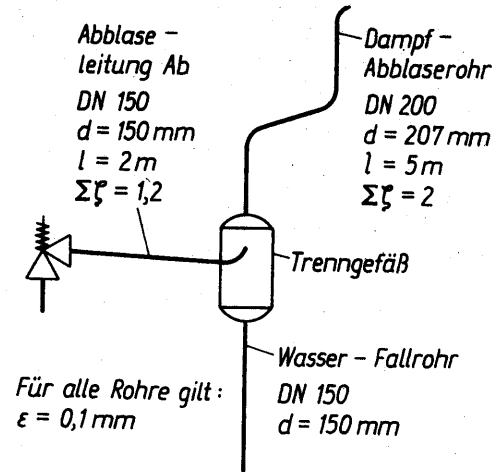
$$\dot{m}_W = 5,94 \cdot (1 - 0,172) \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 4,92 \text{ kg/s}$$

Sattdampfstrom nach Gl. (5.24)

$$\dot{m}_D = 5,94 \cdot 0,172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,02 \text{ kg/s}$$

Geschwindigkeit am Rohraustritt nach Gl. (5.4) mit  $v = v_a = v''$

$$w = \frac{4 \cdot 1,02 \cdot 1,6946}{\pi \cdot 0,207^2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 51,4 \text{ m/s}$$



**Bild 5.10** Geometrische Gegebenheiten des im Beispiel 3 betrachteten Abblasesystems

REYNOLDS-Zahl nach Gl. (5.5) mit  $\eta = \eta_a = \eta''$

$$Re = \frac{51,4 \cdot 0,207}{12,26 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6946} = 5,1 \cdot 10^5$$

Relative Rauigkeit

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0,1}{207} = 0,0005$$

Rohrreibungsbeiwert nach Bild 5.4

$$\lambda = 0,018$$

Druckverlust nach Gl. (5.3)

$$\Delta p_{DA,a} = \left( 0,018 \cdot \frac{5}{0,207} + 2 \right) \cdot \frac{51,4^2}{2 \cdot 1,6946} \text{ Pa} = 1898 \text{ Pa}$$

Druck im Trenngefäß nach Gl. (5.25)

$$p_{TG} = \sqrt{0,1^2 + 2 \cdot 1898 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \text{ MPa} = 0,102 \text{ MPa}.$$

Der Druckverlust in der **Abblaseleitung** ergibt sich nach dem Algorithmus für eine Zweiphasenströmung:

Geschwindigkeiten und REYNOLDS-Zahlen nach Gln. (5.4) und (5.5) mit  $v_f = v'$ ;  $v_g = v''$ ;  $\eta_f = \eta'$  und  $\eta_g = \eta''$

$$w_f = \frac{4 \cdot 4,92 \cdot 0,0010434}{\pi \cdot 0,150^2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,29 \text{ m/s}$$

$$Re_f = \frac{0,29 \cdot 0,150}{283,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0010434} = 1,5 \cdot 10^5$$

$$w_g = \frac{4 \cdot 1,02 \cdot 1,6946}{\pi \cdot 0,150^2} \frac{m}{s} = 97,8 \text{ m/s}$$

$$Re_g = \frac{97,8 \cdot 0,150}{12,26 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6946} = 7,1 \cdot 10^5$$

Rohrreibungsbeiwert für  $\varepsilon/d = 0,0007$  nach Bild 5.4

$$\lambda_f = 0,020$$

$$\lambda_g = 0,018$$

Druckverlust der Einzelphasen nach Gl. (5.3)

$$\Delta p_f = \left( 0,020 \cdot \frac{2}{0,150} + 1,2 \right) \cdot \frac{0,29^2}{2 \cdot 0,0010434} \text{ Pa} = 59,1 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_g = \left( 0,018 \cdot \frac{2}{0,150} + 1,2 \right) \cdot \frac{97,8^2}{2 \cdot 1,6946} \text{ Pa} = 4064 \text{ Pa}$$

LOCKHART-MARTINELLI-Parameter nach Gl. (5.6)

$$X_{LM} = \sqrt{\frac{59,1}{4064}} = 0,12$$

Korrekturfaktor nach Bild 5.5

$$\Phi_f = 16$$

Druckverlust der Verbindungsleitung nach Gl. (5.7)

$$\Delta p_{Z,Ab} = 16^2 \cdot 59,1 \text{ Pa} = 0,0151 \text{ MPa}$$

Die mittlere Geschwindigkeit des Zweiphasengemisches ergibt sich nach Gl. (5.4a) zu

$$w = (97,8 + 0,29) \frac{m}{s} = 98,1 \text{ m/s}$$

Gemäß Gl. (5.26) beträgt der Gegendruck am Ventilaustritt

$$p_G = (0,0151 + 0,102) \text{ MPa} = 0,117 \text{ MPa}$$

Demgegenüber ist nach Gl. (5.8) der Wert

$$p_{EG,zul} \leq [0,15 \cdot (0,85 - 0,1) + 0,1] \text{ MPa} = 0,213 \text{ MPa}$$

zulässig, d.h., das konzipierte Abblasesystem ist realisierbar.

Die Geschwindigkeit im **Wasser-Fallrohr** beträgt gemäß Gl. (5.4)

$$w = \frac{4 \cdot 4,92 \cdot 0,0010434}{\pi \cdot 0,150^2} \frac{m}{s} = 0,29 \text{ m/s}$$

Sie liegt somit unter dem Grenzwert von 1 m/s.

Die Mindesthöhe der Wasservorlage im Auffanggefäß berechnet sich nach Gl. (5.21) mit

$$e_W = 1/v' \text{ zu}$$

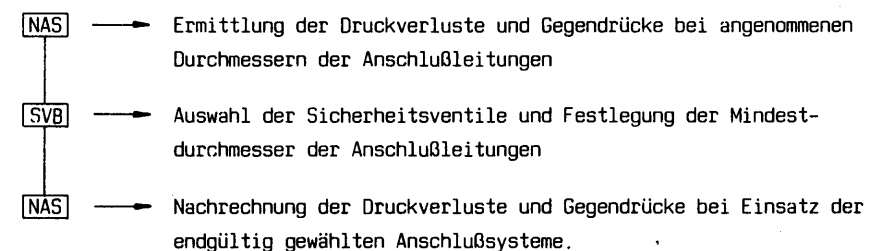
$$h_{wV} = \frac{(0,102 - 0,1) \cdot 10^6}{9,81} \cdot 0,0010434 \text{ m} = 0,21 \text{ m}$$

## 5.4. Nachweisalgorithmus

Die vorangegangenen Abschnitte zeigten die ursächliche Verflechtung zwischen Auswahl des Sicherheitsventils und dessen Einordnung in das Zuleitungs- und Abblasesystem. Die Nachrechnung des Rohrsystems muß deshalb vor und auch nach der Bemessung des Sicherheitsventils möglich sein.

Während es für den zulässigen Druckverlust in der Zuleitung zum Sicherheitsventil feste Grenzwerte gibt, existiert für die Abblasesysteme lediglich die Forderung, daß keine Funktionsbeeinträchtigung des Ventils erfolgen darf. Grenzgedrücke gelten in Abhängigkeit des Abblasemediums und der Ventilbauart. Sie sind in den speziellen Zulassungsurkunden festgelegt und somit nicht allgemeingültig in Bemessungskriterien faßbar. Weiterhin existieren Empfehlungen über Maximalgeschwindigkeiten in den Rohrleitungen und die verbindliche Forderung, daß die Durchmesser der Zu- bzw. Abblaseleitung die entsprechenden Anschlüsse der Sicherheitsventile nicht überschreiten dürfen.

Diese komplexe Verflechtung erfordert mitunter die mehrfache Aktivierung des Hauptprogramms **[NAS]** - Nachrechnung der Anschlußsysteme - im Wechsel mit dem Hauptprogramm **[SVB]** - Sicherheitsventilbemessung. Beispielsweise ist der nachfolgende Ablauf mit den speziellen Zielen denkbar:



Die Nachrechnung der Anschlußsysteme mit dem Hauptprogramm **NAS** erfordert folgende Grundlagen:

1. Die Datei "Lastannahmen", in der für maximal 21 Lastfälle die Masseströme, Dichten und Temperaturen vermerkt sind (vgl. Bild 3.17), muß gefüllt sein.
2. Die Ansprechdrücke  $p_{A,1}$  und  $p_{A,2}$  sowie die Variantenkennung V (Datei "Behälter") müssen bekannt sein.
3. Die Fremdgedrücke  $p_{FG}$  und die Geometrie der Zuleitungen sowie der Abblasesysteme einschließlich der Einzelwiderstände sind bei entsprechender Dialogabfrage zu benennen.

Die in den ersten beiden Punkten genannten Forderungen sind nach Ablauf des Hauptprogramms **LZO** - Lastzuordnung - erfüllt. Die im dritten Punkt abgeforderten Daten stehen im unmittelbaren Zusammenhang mit der zu lösenden Aufgabe.

#### 5.4.1. Hauptprogramm

Im Bild 5.11 ist der Datenflußplan **NAS** - Nachrechnung der Anschlußsysteme - dargestellt.

Zunächst wird der Umfang der Nachrechnung festgelegt.

##### Eingabewert

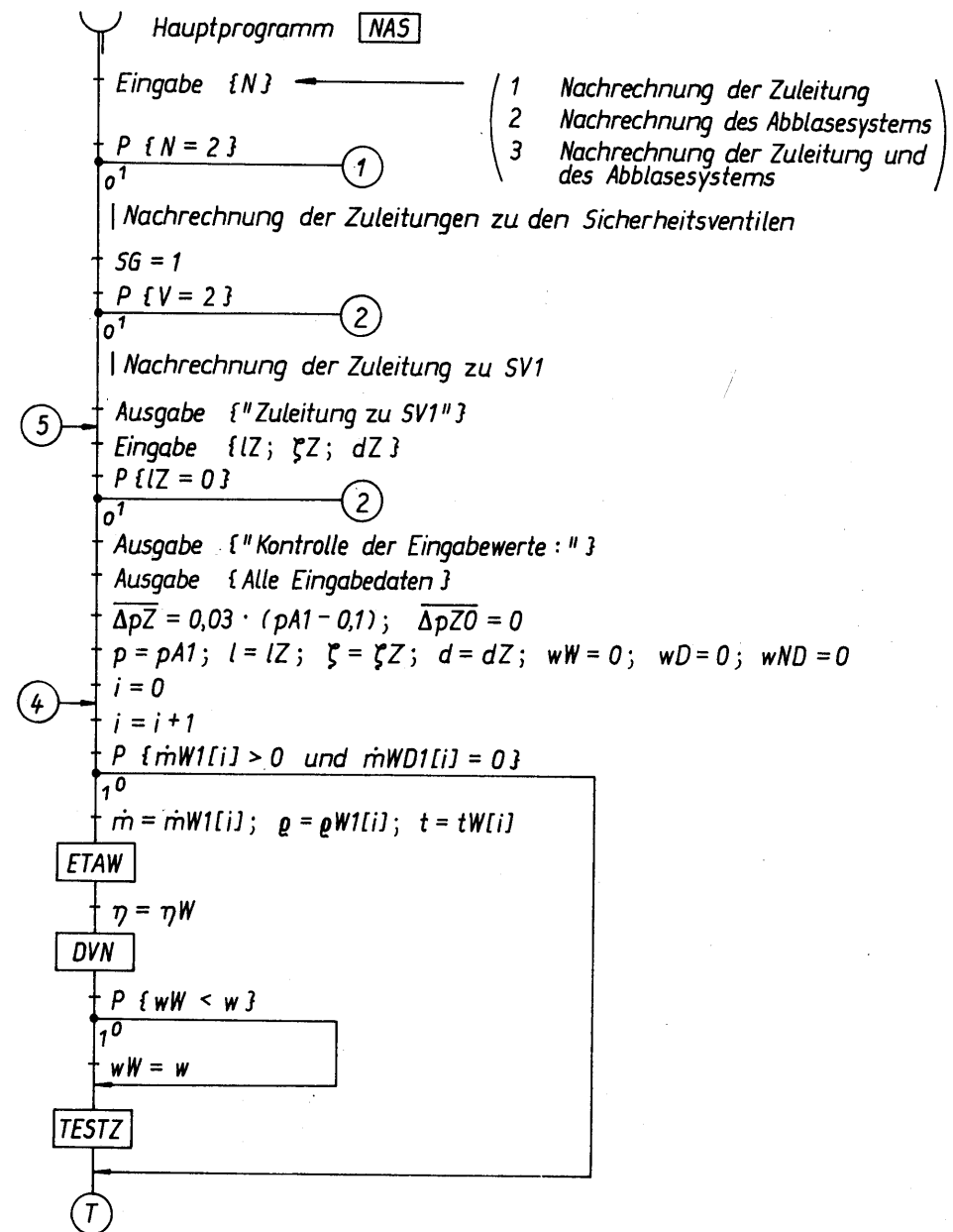
|     |   |                                                   |
|-----|---|---------------------------------------------------|
| N   | - | Nachrechnungsvariante                             |
| N=1 |   | Nachrechnung der Zuleitung                        |
| N=2 |   | Nachrechnung des Abblasesystems                   |
| N=3 |   | Nachrechnung der Zuleitung und des Abblasesystems |

Die Kennzahlen N und V übernehmen die grundsätzliche Programmsteuerung. Würden beispielsweise N=3 und V=4 (Ventildoppelanordnung) gelten, so wären zwei Zuleitungen und zwei Abblasesysteme zu überprüfen. Erfolgte jedoch bei der speziellen Eingabe der geometrischen Daten die Belegung mit Null, so bliebe dieser Anschluß dennoch unbeachtet. Somit ist eine detaillierte Selektierung der Berechnungsfälle möglich.

Das Hauptprogramm gliedert sich in zwei Hauptabschnitte.

##### I. Nachrechnung der Zuleitung

Die Berechnungen der Anschlußleitungen zu den Sicherheitsventilen SV1 und SV2 verlaufen analog, unterscheiden sich aber durch die möglichen Belastungsvarianten (vgl. Abschnitt 2.).



**Bild 5.11** Flußplan des Hauptprogramms **NAS** (Nachrechnung - Anschlußsysteme) zur druckmäßigen Überprüfung der Zuleitungen und Abblasesysteme nach Tabelle 5.1

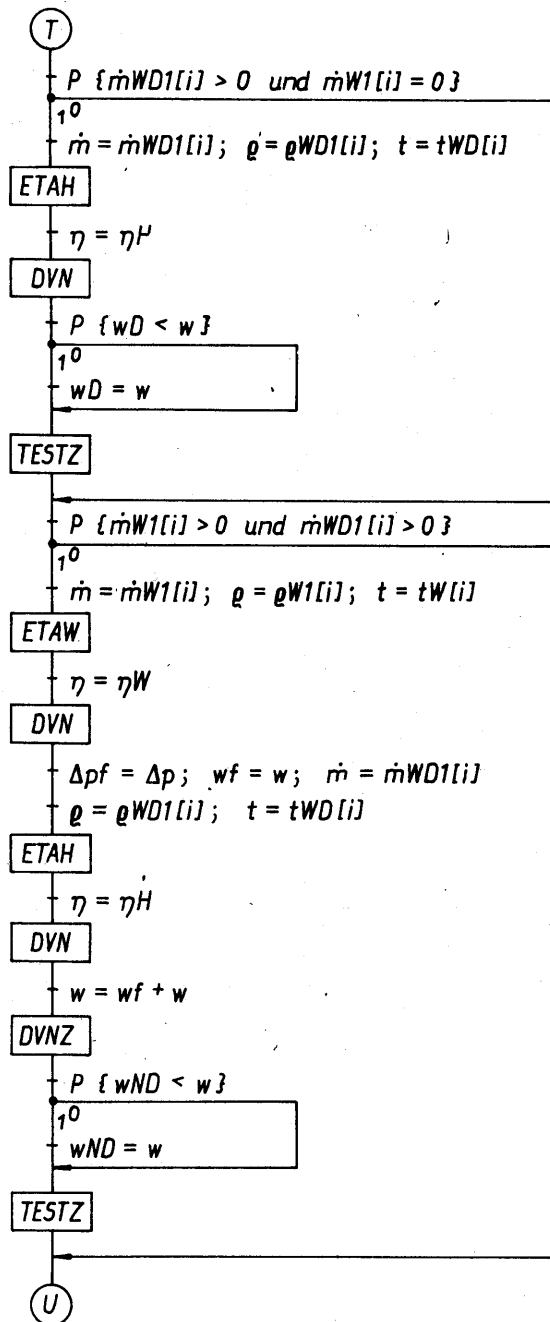


Bild 5.11(2)

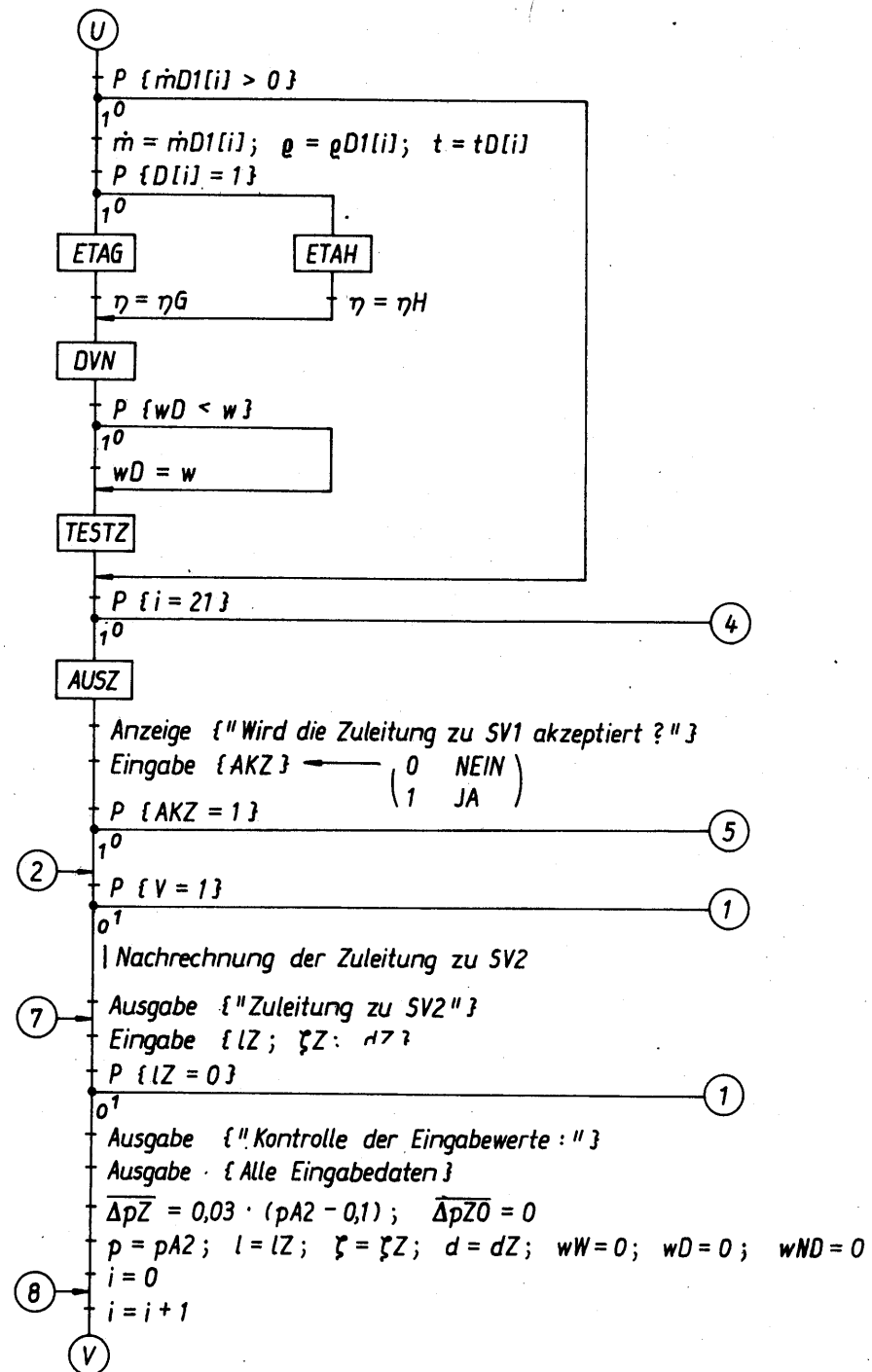


Bild 5.11(3)

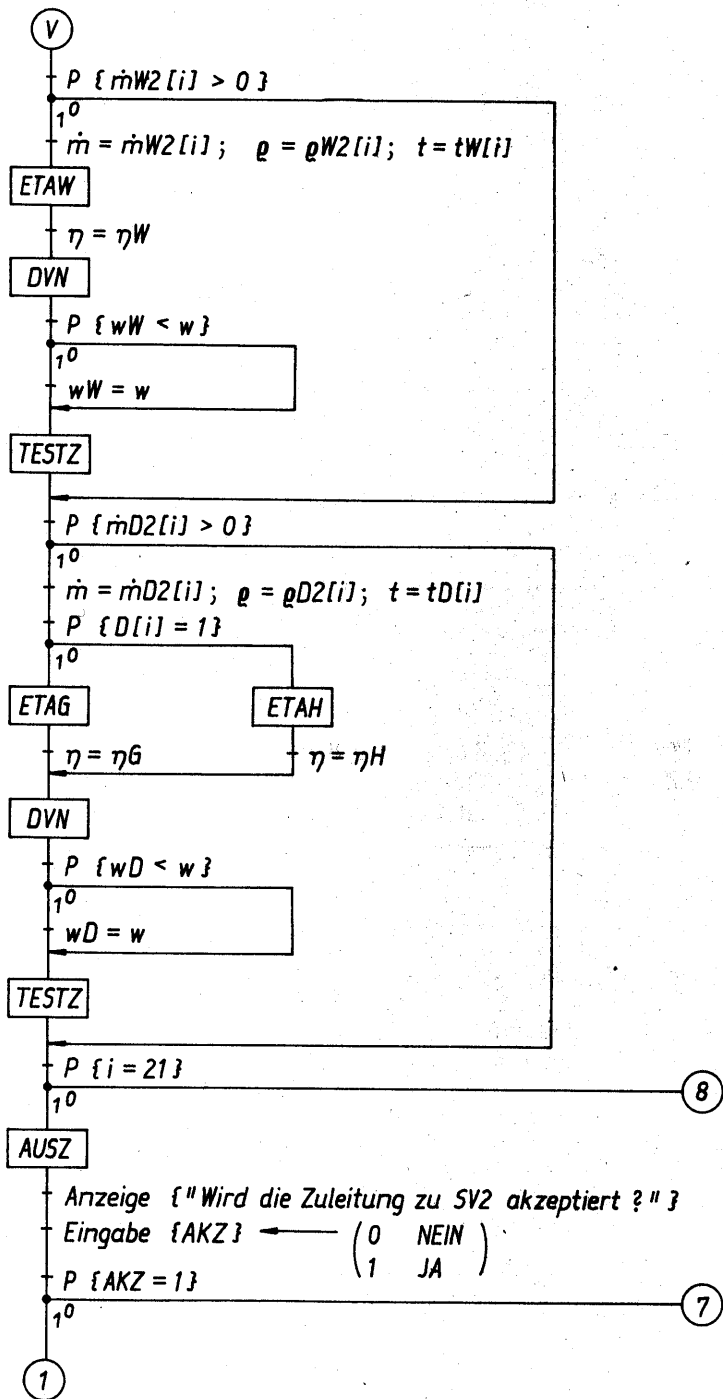


Bild 5.11(4)

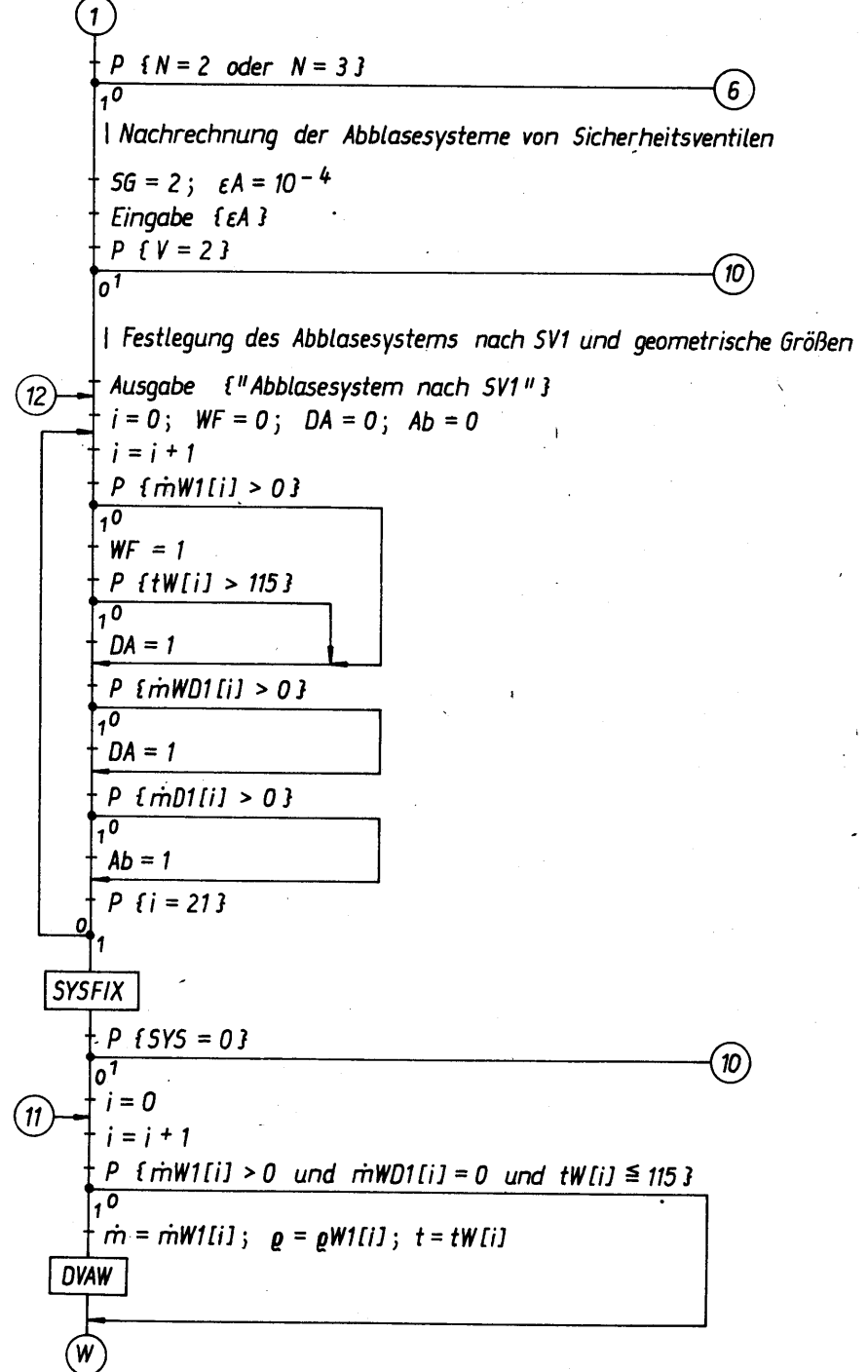
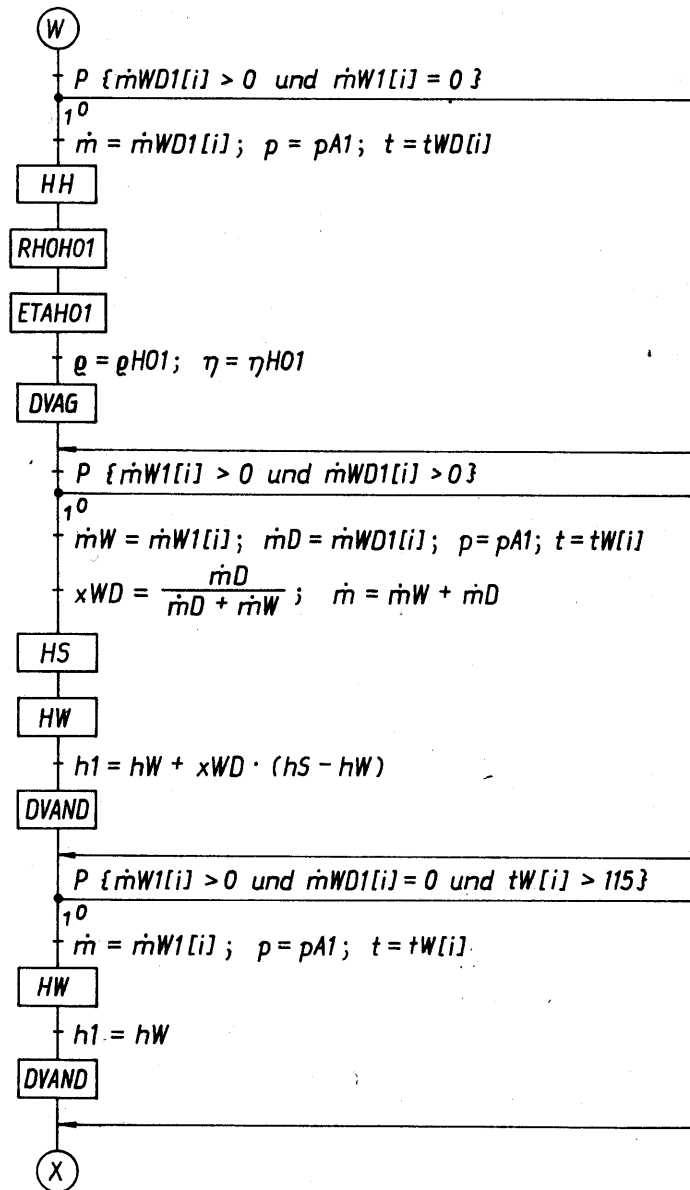
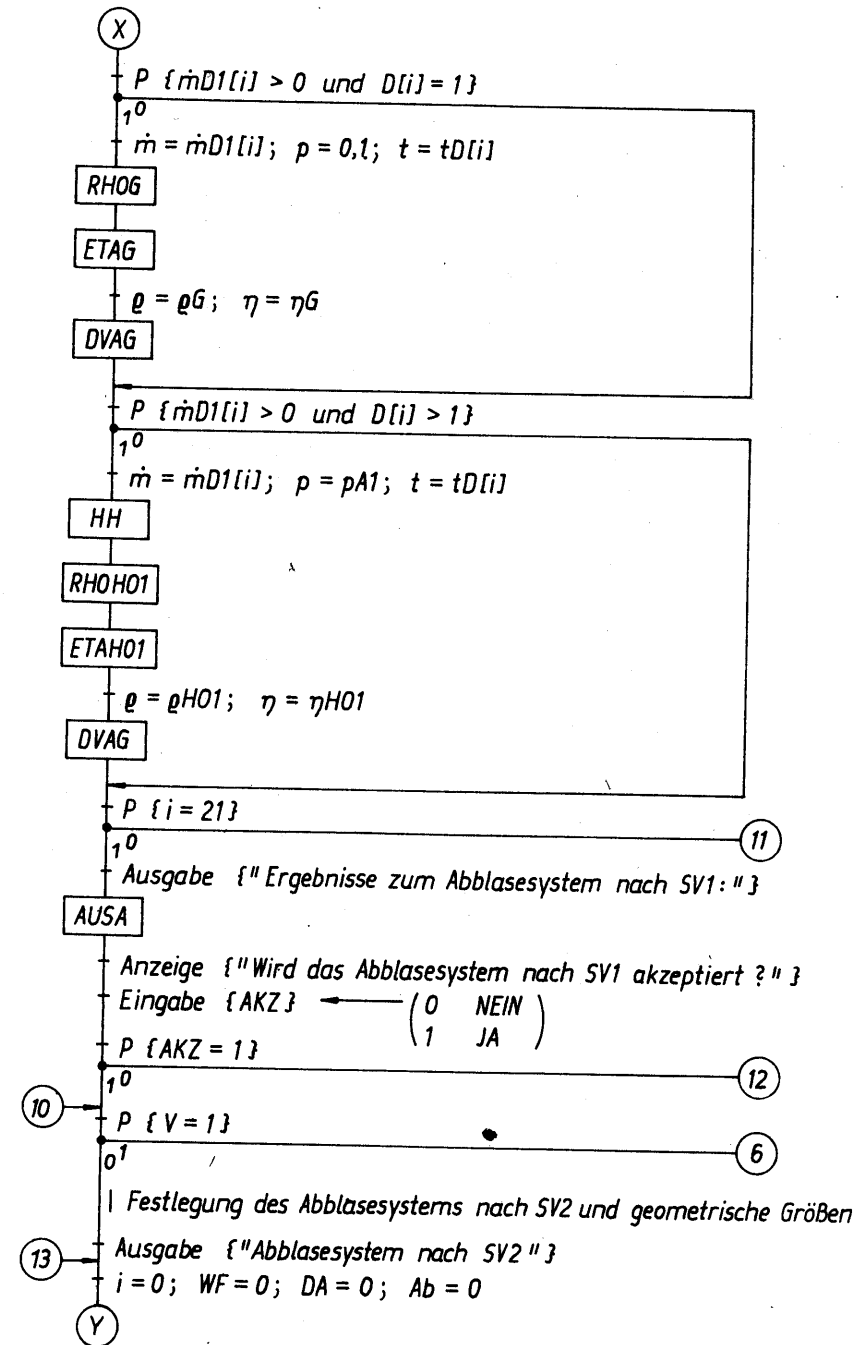


Bild 5.11(5)



**Bild 5.11(6)**



**Bild 5.11(7)**

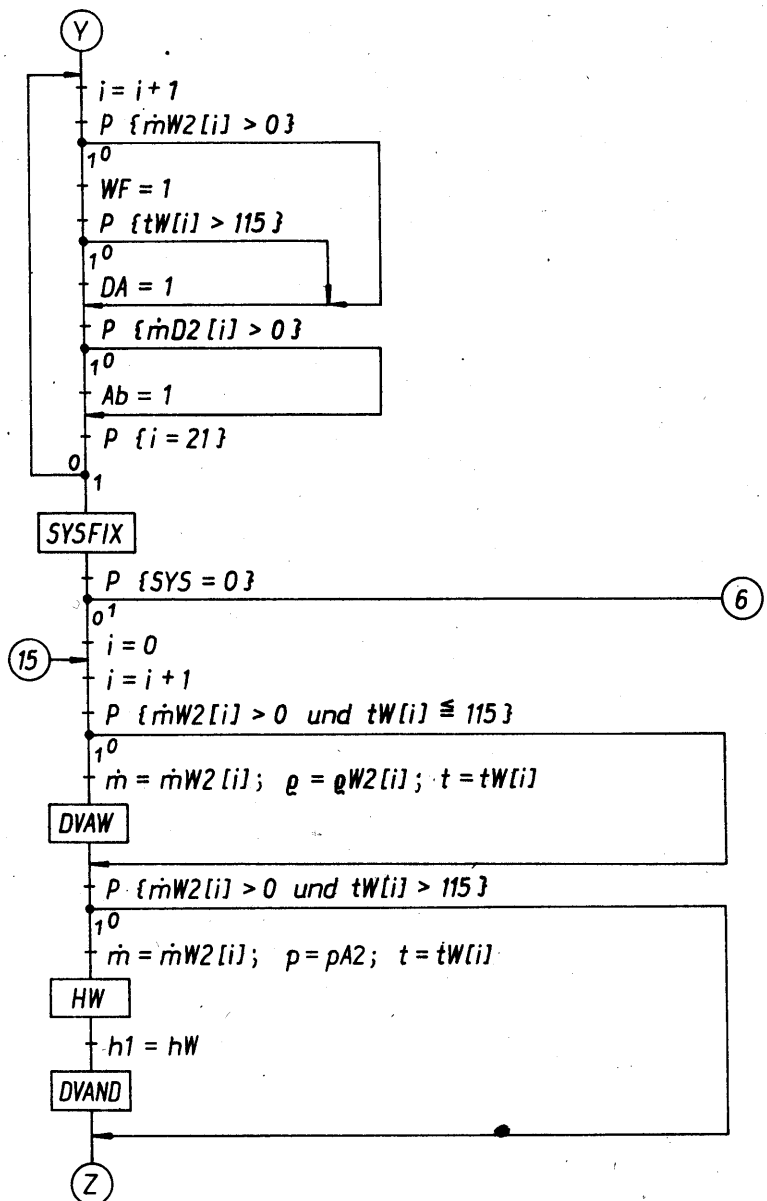


Bild 5.11(8)

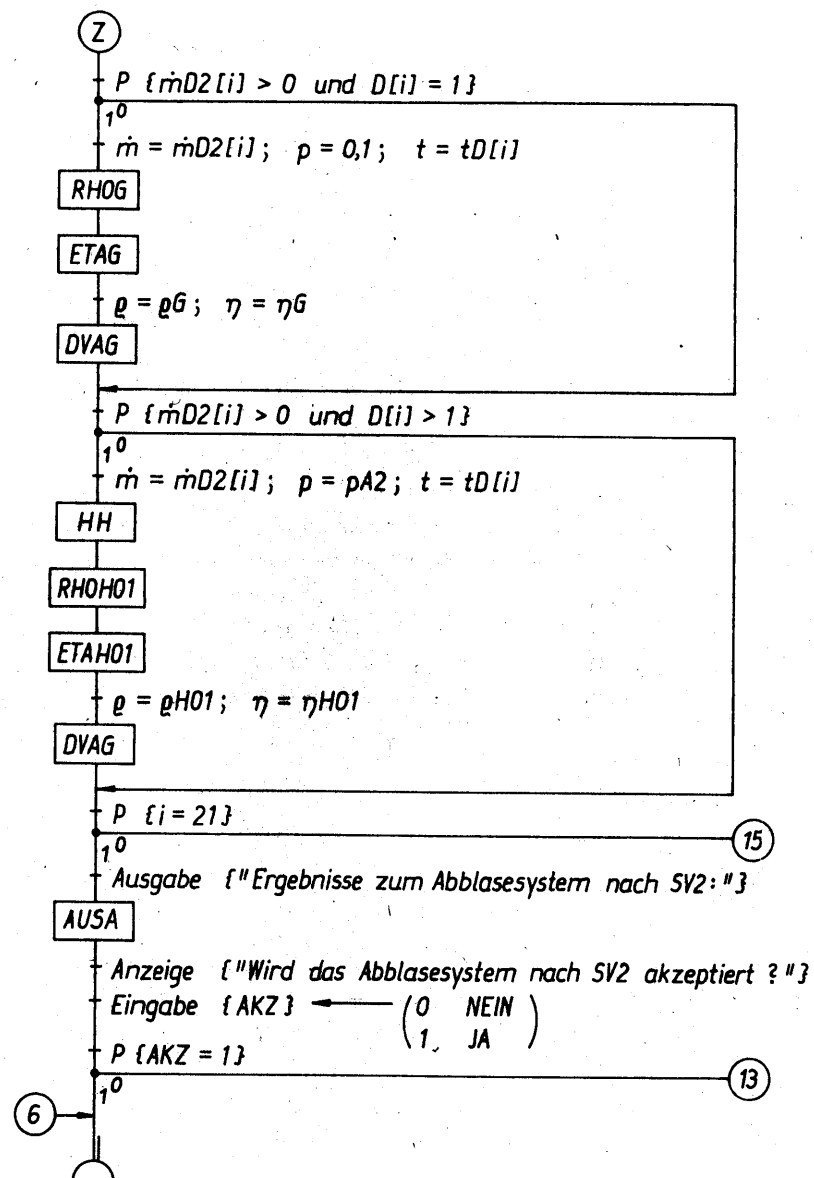


Bild 5.11(9)

**Eingabewerte**

|           |   |                                    |
|-----------|---|------------------------------------|
| LZ        | m | Länge der Zuleitung                |
| $\zeta Z$ | - | Einzelwiderstände in der Zuleitung |
| dZ        | m | Innendurchmesser der Zuleitung     |

Die Eingabedaten werden zur Kontrolle ausgedruckt.

Die Berechnung des zulässigen Druckverlustes  $\Delta p_Z$  erfolgt nach Gl. (5.1).

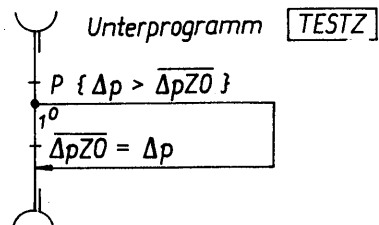
Anschließend wird jeder Lastfall  $i$  betrachtet und zu den aus der Datei "Lastannahme" stammenden Größen - Masseströme, Dichten, Temperaturen - die Druckverluste  $\Delta p$  für eine inkompressible Rohrströmung ermittelt. Die dynamischen Zähigkeiten werden für den Ansprechdruck ( $p = p_A$ ) und die vorgegebene Temperatur  $t$  mit den im Anhang aufgeführten Modulen [ETAW] für Wasser, [ETAH] für Heiß- und Sattedampf und [ETAG] für Luft- und Stickstoff ermittelt.

Die Druckverlustrechnung erfolgt nach Gl. (5.3) für Wasser, Dampf und Gas sowie nach Gl. (5.7) für Naßdampf, wobei für die einphasige Strömung das Unterprogramm [DVN] und für die Zweiphasenströmung zusätzlich das Unterprogramm [DVNZ] zum Einsatz kommen. Durch Tests werden die maximalen Geschwindigkeiten  $wW$  bei Wasserdurchfluß,  $wD$  bei Gas- oder Dampfbeaufschlagung und  $wND$  bei Naßdampfströmung ermittelt und mit dem Unterprogramm [TESTZ] (Bild 5.12) der maximale Druckverlust der Zuleitung bestimmt. Die genannten Maximalwerte gibt das Unterprogramm [AUSZ] (Bild 5.13) in Gegenüberstellung zum zulässigen Druckverlust  $\Delta p_Z$  und zu empfohlenen Geschwindigkeitsobergrenzen aus. Mit dem

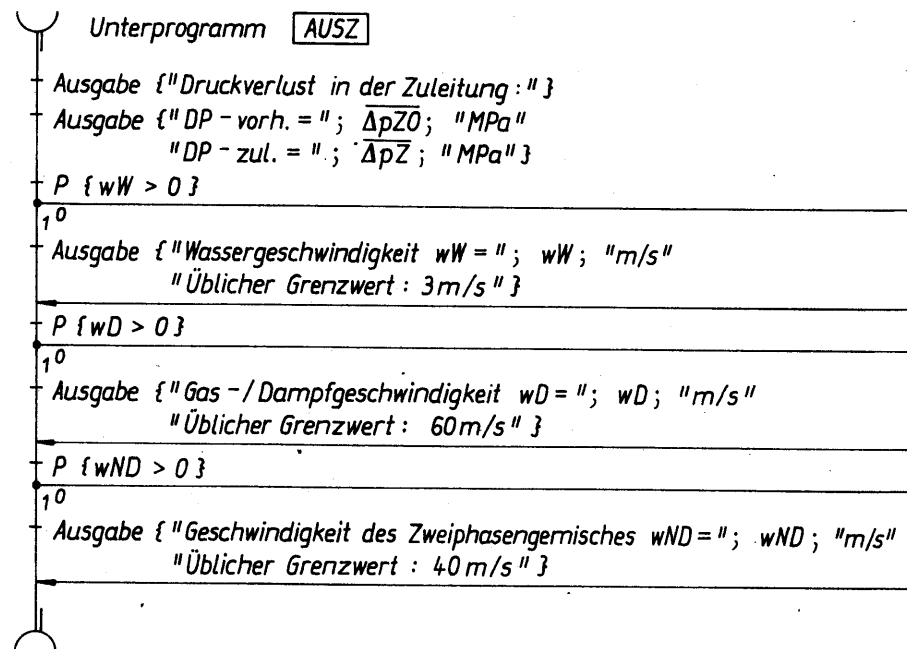
**Eingabewert**

|     |       |                  |
|-----|-------|------------------|
| AKZ | -     | Akzeptanzkennung |
|     | AKZ=0 | NEIN             |
|     | AKZ=1 | JA               |

wird das Ergebnis und damit die Geometrie der Zuleitung akzeptiert oder eine Rechnungswiederholung - beginnend mit der Eingabe für eine neue Geometrie - veranlaßt.



**Bild 5.12** Flußplan des Unterprogramms [TESTZ] zur Ermittlung des maximalen Druckverlustes in der Zuleitung



**Bild 5.13** Flußplan des Unterprogramms [AUSZ] (Ausgabe - Zuleitung) zur zusammengefaßten Datenausgabe für die Zuleitung

**II. Nachrechnung des Abblasesystems**

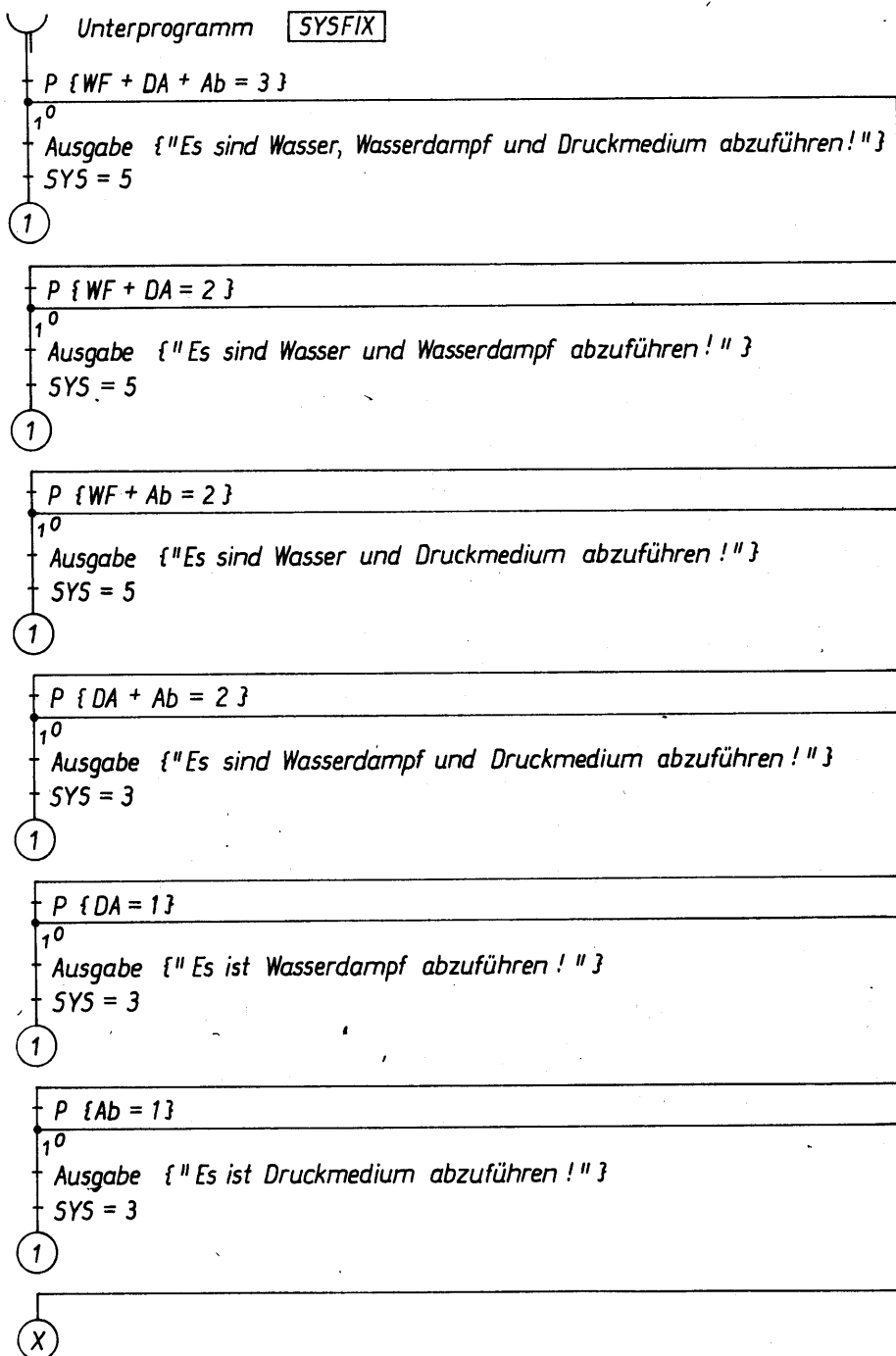
Die Betrachtung der Abblasesysteme nach SV1 und SV2 erfolgt völlig gleichartig, aber sie unterscheidet sich von der Nachrechnung der Zuleitung wesentlich. Erstens ist die Gestaltung der Abblasesysteme - wie Tabelle 5.1 deutlich zeigt - sehr variantenreich, und zweitens muß die Bestimmung des Druckverlaufs differenziert nach der Methode für kompressible und für inkompressible Fluide wegen möglicherweise großer Druckgefälle erfolgen. Schließlich sind die Zustands- und Stoffwerte am Sicherheitsventilaustritt neu zu bestimmen.

Da die Abblasesysteme meistens mit der Atmosphäre in Verbindung stehen, sind sie der Korrosion verstärkt ausgesetzt. Deshalb ist für Abblasesysteme der

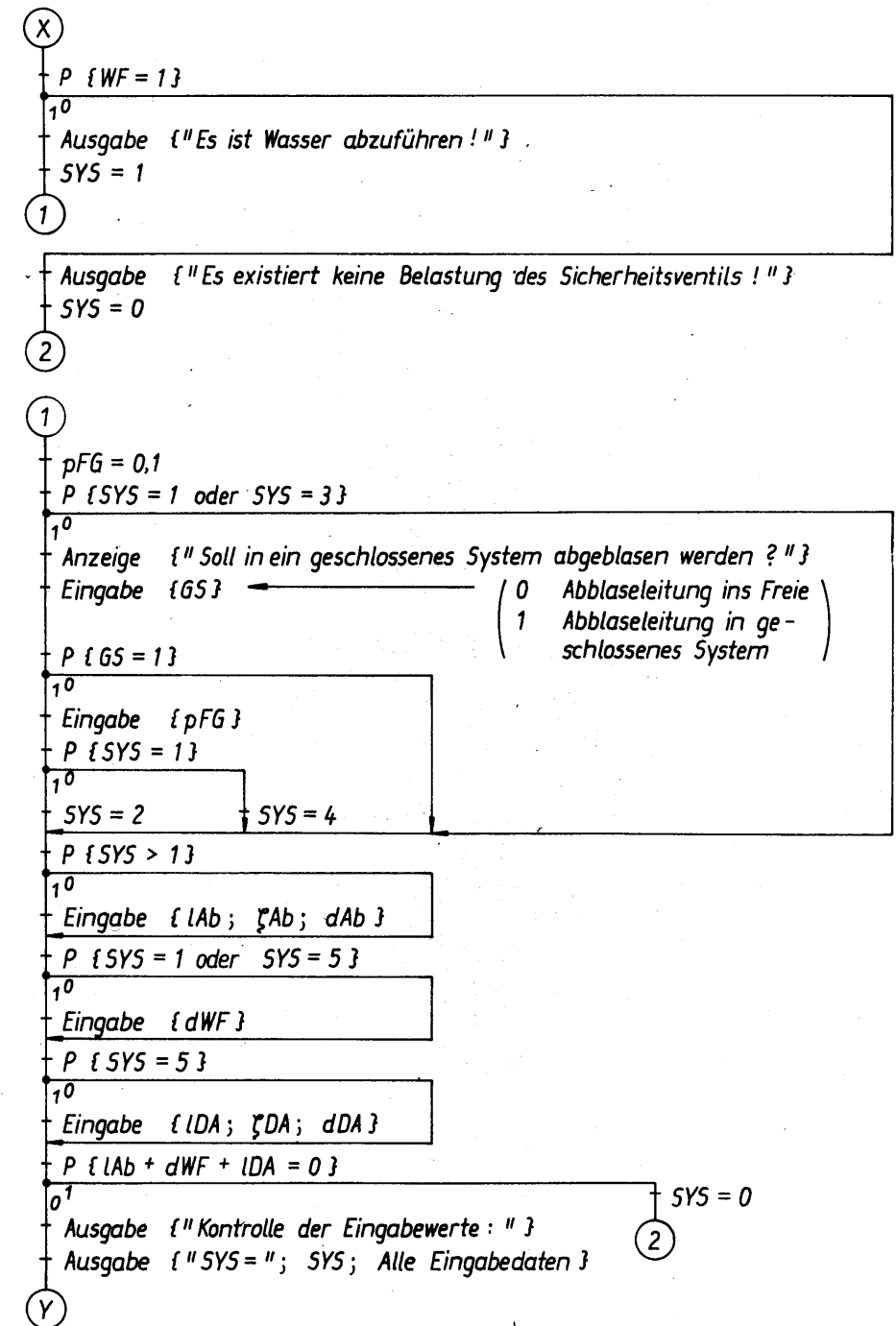
**Eingabewert**

$\epsilon_A$  | m | Rohrrauigkeit

zusätzlich vorgesehen. Es wird bei der Programmabarbeitung der Eingabewert  $\epsilon_A = 0,0001$  m vorgeschlagen.



**Bild 5.14** Flußplan des Unterprogramms **SYSFIX** (Fixierung des Abblasesystems) zur Auswahl und Kennzeichnung des erforderlichen Abblasesystems sowie zur Eingabe der geometrischen Abmessungen und Einzelwiderstandsbeiwerte



**Bild 5.14(2)**

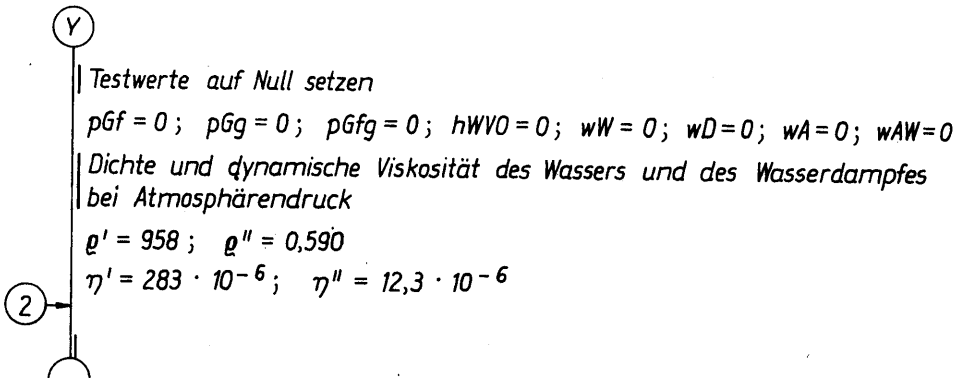


Bild 5.14(3)

Zunächst wird in einem Durchgang aller Lastfälle geprüft, welche Medienarten nach der Entspannung im Sicherheitsventil abzuführen sind.

Im Unterprogramm **SYSTIX** (Bild 5.14) werden die Arten der Fluidströme ausgegeben und zunächst eine Vorauswahl des Abblasesystems - welches durch die Kennzahl SYS (vgl. Tabelle 5.1) charakterisiert wird - getroffen. Es folgen:

#### Eingabewerte

|              |     |                                     |                   |
|--------------|-----|-------------------------------------|-------------------|
| GS           | -   | Systemabschluß                      |                   |
|              |     | GS=0 Abblas ins Freie               |                   |
|              |     | GS=1 Abblas in geschlossenes System |                   |
| pFG          | MPa | Fremdgedruckt                       |                   |
| lAb          | m   | Länge                               | Abblaseleitung    |
| $\zeta_{Ab}$ | -   | Einzelwiderstände                   |                   |
| dAb          | m   | Innendurchmesser                    |                   |
| lDA          | m   | Länge                               | Dampf-Abblaserohr |
| $\zeta_{DA}$ | -   | Einzelwiderstände                   |                   |
| dDA          | m   | Innendurchmesser                    |                   |
| dWF          | m   | Innendurchmesser                    | Wasser-Fallrohr   |

Zur Kontrolle erfolgt der Ausdruck aller Eingaben und der Kennzahl SYS. Anschließend werden die Gegendrücke, die Höhe der Wasservorlage und die Geschwindigkeiten mit Null belegt sowie die Dichten und dynamischen Zähigkeiten des Wassers und Wasserdampfes bei Atmosphärendruck benannt.

Im weiteren werden alle Lastfälle i differenziert nach den aus dem Sicherheitsventil austretenden Medien betrachtet. Die Gegendrücke werden mit Hilfe der Unterprogramme

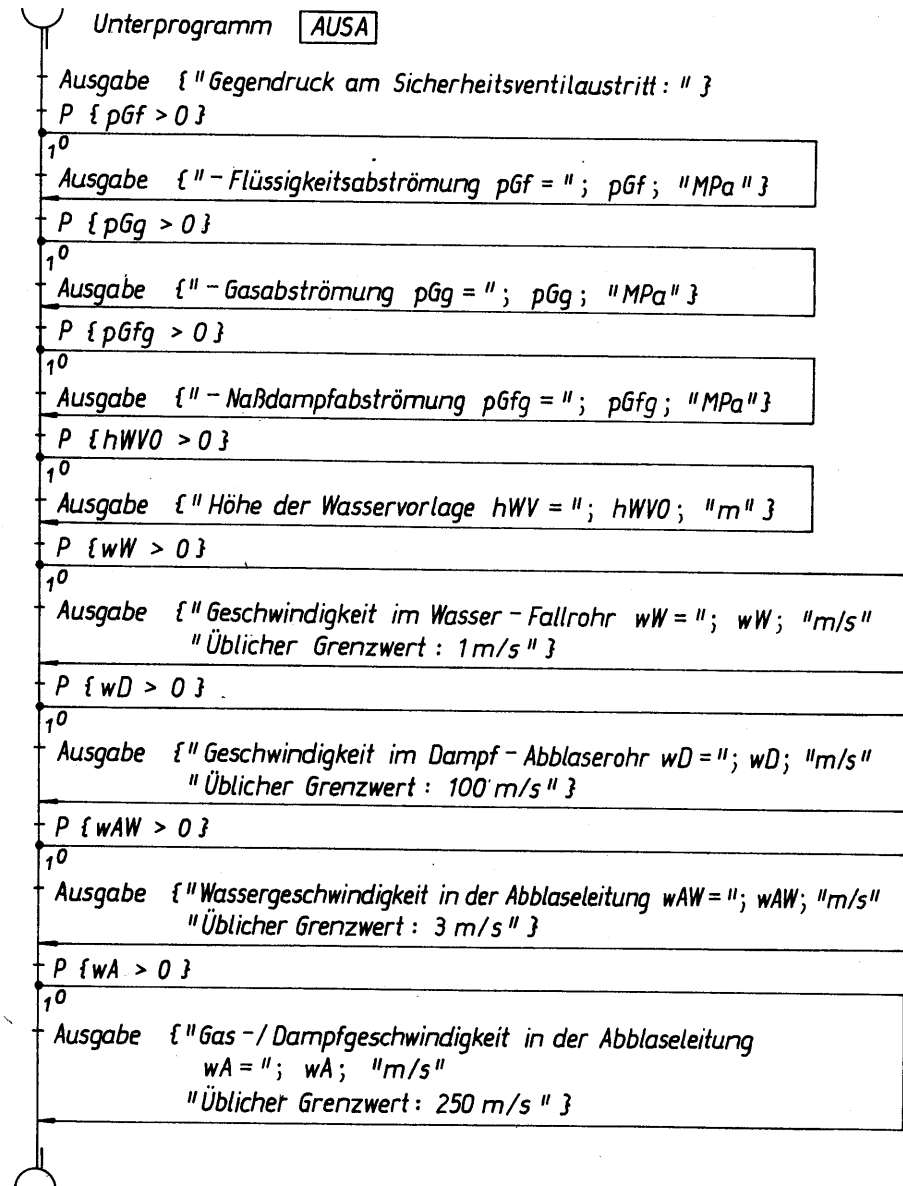


Bild 5.15 Flußplan des Unterprogramms **AUSA** (Ausgabe - Abblasesystem) zur zusammengefaßten Datenausgabe für das Abblasesystem

[DVAW], [DVAG] und [DVAND] - Erläuterungen dazu finden sich im nächsten Abschnitt - berechnet.

Im Falle der Sattedampf- oder Heißdampfabströmung sind die im Anhang aufgeführten Module [HH], [RHOH01], [ETAH01] dem Unterprogramm [DVAG] vorzuschalten. Ausgehend von der spezifischen Enthalpie vor dem Sicherheitsventil hH werden in Analogie zum Bild 5.9 die Dichte und die Viskosität des Wasserdampfes bei Entspannung auf Atmosphärendruck bestimmt. Das evtl. Vorhandensein eines Fremdgedruckes wird in [DVAG] berücksichtigt.

Inhaltlich analog verläuft der Berechnungsweg für die Gase Luft und Stickstoff. Es sind lediglich die Module [RHOG] und [ETAG] gemäß Anhang zu verwenden, wobei auf die Temperatur t vor dem Sicherheitsventil bezogen wird.

Beim Abblasen von Naßdampf ist vor dem Einschalten des Unterprogramms [DVAND] die spezifische Enthalpie vor dem Sicherheitsventil zu bestimmen. Dies geschieht mit dem Dampfgehalt xWD, den Modulen [HS] und [HW] gemäß der Gln. (A7) und (A9) und der Beziehung  $h_l = h_W + x_{WD} (h_S - h_W)$ .

Die Ergebnisse werden mit dem Unterprogramm [AUSA] (Bild 5.15) ausgegeben. Sie beinhalten differenziert nach Medienart die Gegendrucke und Geschwindigkeiten sowie die Höhe der Wasservorlage. Mit dem

#### Eingabewert

|     |       |                  |
|-----|-------|------------------|
| AKZ | -     | Akzeptanzkennung |
|     | AKZ=0 | NEIN             |
|     | AKZ=1 | JA               |

wird das Ergebnis und damit das betrachtete Abblasesystem akzeptiert oder nach Eingabe einer neuen Geometrie die gesamte Rechnung wiederholt.

### 5.4.2. Unterprogramm zur Druckberechnung

#### [DVN] Druckverlustnachrechnung

Kernstück der gesamten Druckermittlung bildet das Unterprogramm [DVN]. Der Datenflußplan, der die Gln. (5.3) bis (5.5) beinhaltet, ist im Bild 5.16 dargestellt. Er entspricht der Druckverlustberechnung für eine inkompressible Rohrströmung nach /8, S. 96/. Er wurde lediglich um eine veränderbare Rohrrauigkeit  $\epsilon_A$  für Abblasesysteme ergänzt. Dabei gilt die Steuergröße SG=1 für die Zuleitungen und SG=2 für die Abblasesysteme.

Die Ergebnisse Geschwindigkeit w in m/s und Druckverlust  $\Delta p$  in MPa finden Eingang in weitere Berechnungen.

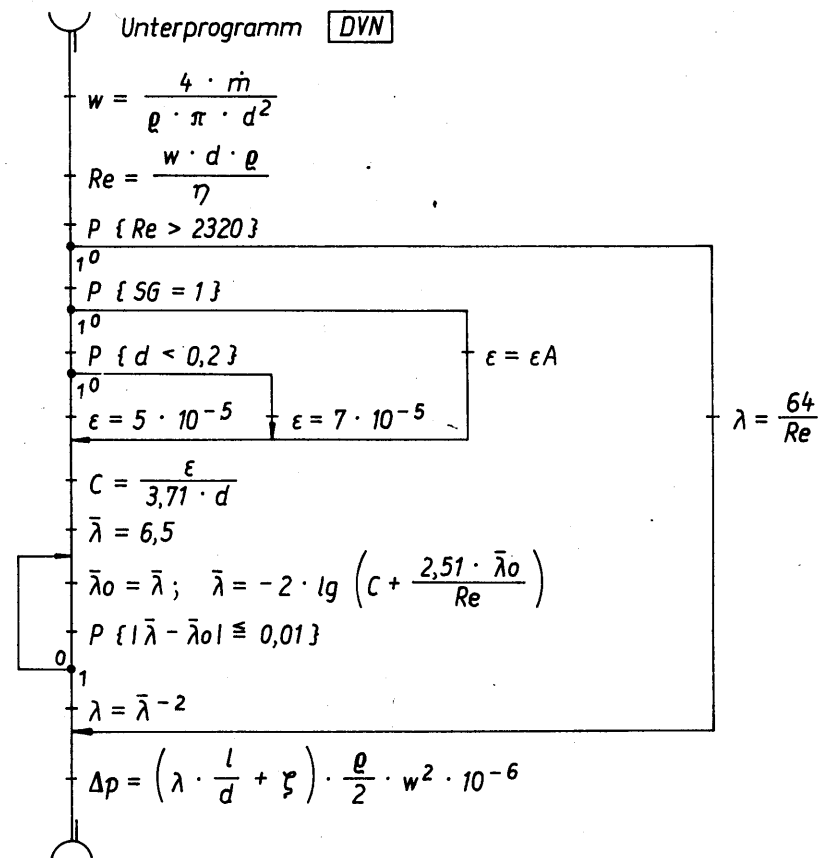


Bild 5.16 Flußplan des Unterprogramms [DVN] (Druckverlustnachrechnung) zur Bestimmung des Druckverlustes einer inkompressiblen Rohrströmung

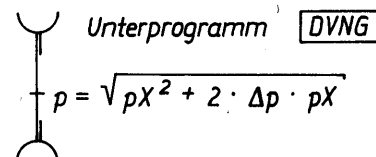
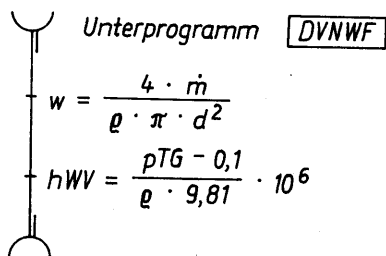
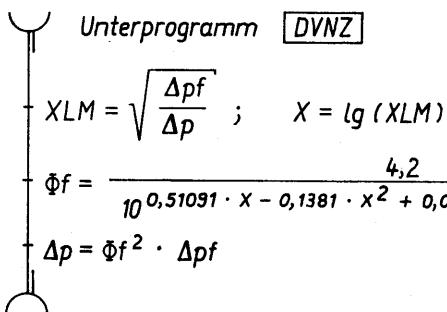


Bild 5.17 Flußplan des Unterprogramms [DVNG] (Druckverlustnachrechnung - Gasströmung) zur Bestimmung des Eintrittsdruckes einer Gas- bzw. Dampfströmung bei gegebenem Austrittsdruck und "inkompressibel" berechnetem Druckverlust



**Bild 5.18** Flußplan des Unterprogramms **DVNWF** (Druckverlustnachweis - Wasser-Fallrohr) zur Ermittlung der Geschwindigkeit und der Höhe einer Wasservorlage



**Bild 5.19** Flußplan des Unterprogramms **DVNZ** (Druckverlustnachrechnung - Zweiphasenströmung) zur Zusammenfassung der Druckverluste der Einzelphasen zum Druckverlust der Zweiphasenströmung

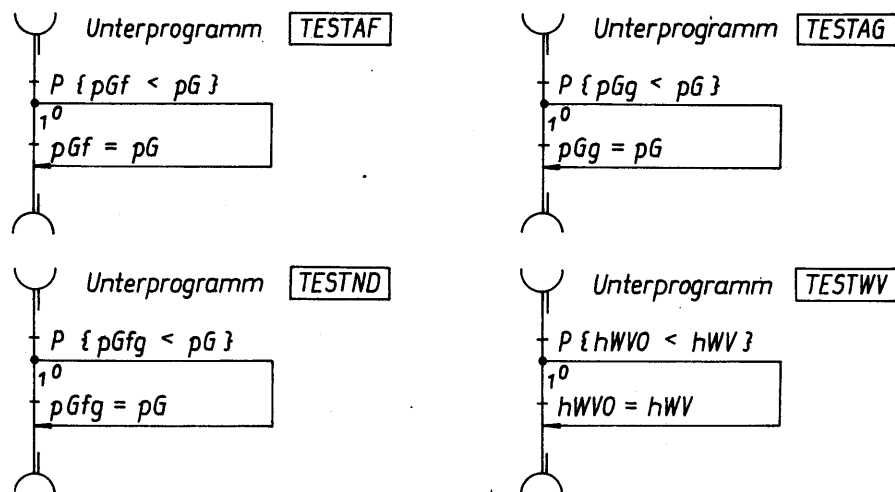
#### **DVNG** Druckverlustnachrechnung einer Gasströmung

Für eine isotherme Gas- bzw. Dampfströmung mit dem Druck  $p_X$  in MPa am Ende der Rohrleitung berechnet sich näherungsweise der Eingangsdruck  $p$  in MPa nach dem im Bild 5.17 gezeigten Datenflußplan (vgl. Gl. (5.17)). Die Größe  $\Delta p$  entspricht dem Druckverlust gemäß **DVN**, wobei sich die Zustands- und Stoffwerte auf  $p_X$  beziehen. Dies stellt bezüglich der dynamischen Viskosität  $\eta$  eine Näherung dar.

#### **DVNWF** Druckverlustnachweis für das Wasser-Fallrohr

Für die zu Gl. (5.13) erläuterten Bedingungen - senkrechte Wasserleitung nach unten mit freiem Ausfluß - genügt der Nachweis, daß die Geschwindigkeit  $w < 1$  m/s beträgt. Stellt das Wasser-Fallrohr gemäß Tabelle 5.1 (SYS=5) die Entwässerung eines Trenngefäßes (Entspannungstopfes) - in dem der Druck  $p_{TG}$  herrscht - dar, so ist eine Wasservorlage der Höhe  $h_{WV}$  in m zu gewährleisten.

Bild 5.18 gibt den Datenflußplan wieder.



**Bild 5.20** Flußpläne der Unterprogramme **TESTAF**, **TESTAG**, **TESTND**, **TESTWV** zur Ermittlung der maximalen Gegendrucke bei Wasser-, Gas/Dampf- oder Naßdampf-Durchsatz und zur Bestimmung der maximalen Höhe der Wasservorlage im Wasser-Fallrohr

#### **DVNZ** Druckverlustnachrechnung einer Zweiphasenströmung

Vorab sind die Druckverluste mit **DVN** für die Flüssigphase mit dem Ergebnis  $\Delta p_f$  und für die Dampfphase mit  $\Delta p$  zu ermitteln. Der Datenflußplan im Bild 5.19 beinhaltet die Auswertung der Gln. (5.6) und (5.7) sowie eine Approximation des Korrekturfaktors  $\Phi f$  nach /8, S. 215/.

Als Ergebnis erhält man den Druckverlust der Zweiphasenströmung  $\Delta p$  in MPa.

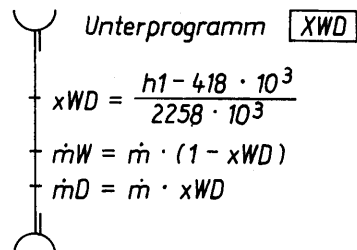
#### **TESTAF** **TESTAG** **TESTND** Ermittlung des maximalen Gegendruckes

#### **TESTWV** Ermittlung der maximalen Wasservorlage

Die im Bild 5.20 zusammengestellten Tests dienen der Ermittlung der maximalen Gegendrucke bei Wasserbeaufschlagung  $p_{Gf}$ , bei Gas- oder Dampfdurchströmung  $p_{Gg}$  sowie bei Durchsatz von Naßdampf  $p_{Gfg}$  und der Bestimmung der höchsten erforderlichen Wasservorlage  $h_{WVO}$ .

#### **XWD** Bestimmung des Dampfgehaltes

Die Entspannung von Heißwasser oder Naßdampf mit der spezifischen Enthalpie  $h_1$  vor dem Sicherheitsventil auf Atmosphärendruck führt zu einer weiteren Verdampfung. Der



**Bild 5.21** Flußplan des Unterprogramms **XWD** (X - Wasserdampf) zur Bestimmung des Dampfgehaltes bei der Entspannung von Heißwasser oder Naßdampf auf Atmosphärendruck

sich ergebende Dampfgehalt  $xWD$  sowie die Massestromanteile  $\dot{m}W$  und  $\dot{m}D$  berechnen sich entsprechend der Gln. (5.22) bis (5.24). Sie sind im Datenflußplan des Bildes 5.21 enthalten.

Die vorgestellten Kleinalgorithmen werden zur Druckberechnung des Abblasesystems medienbezogen zusammengefaßt. Die Formen der Abblasesysteme sind in Tabelle 5.1 erläutert.

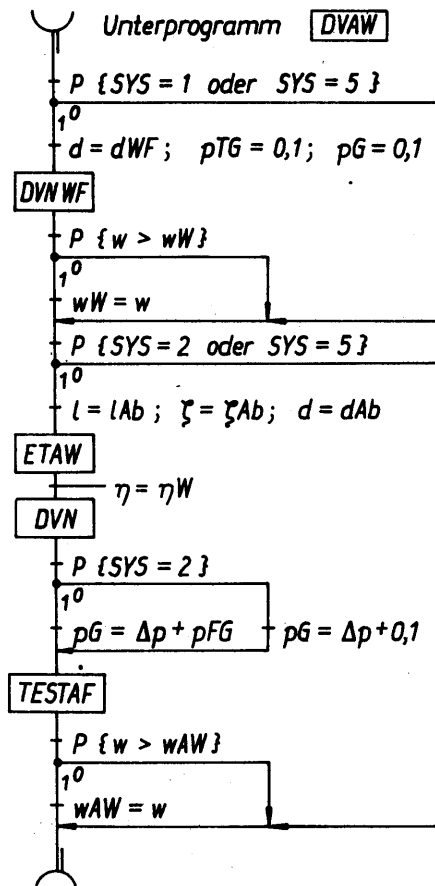
#### **DVAW** Druckverlust des Abblasesystems bei Wasserabströmung

Der Datenflußplan (Bild 5.22) ist in Abhängigkeit des gewählten Systems (Kennzahl SYS) stark strukturiert. Wenn SYS=1 oder SYS=5 gilt, wird für das Wasser-Fallrohr mit **DVNWF** die Geschwindigkeit  $w$  bestimmt. Im Falle SYS=2 oder SYS=5 erfolgt die Druckverlustermittlung für die Abblaseleitung mit Hilfe des Moduls **ETAW** und des Unterprogramms **DVN**.

Zur Bestimmung des Gegendruckes sind die Gln. (5.12) bis (5.15) integriert.

#### **DVAG** Druckverlust des Abblasesystems bei Gasabströmung

Der im Bild 5.23 dargestellte Datenflußplan ist für die fluide Luft, Stickstoff, Sattdampf und Heißdampf anwendbar. Wenn SYS=5 gilt, wird zunächst der Druck  $p$  im Trenngefäß infolge der Durchströmung des Dampfrohres DA mittels **DVN** und **DVNG** berechnet. Anschließend wird mit den gleichen Unterprogrammen für die Abblaseleitung der Gegendruck  $pG$  ermittelt. Dabei ist der Druck am Ende der Abblaseleitung  $pX$  differenziert in Ansatz zu bringen. Es gelten für SYS=3 der Atmosphärendruck  $pX = 0,1$  MPa, für SYS=5 der vorher berechnete Druck im Trenngefäß  $pX = p$  und für SYS=4 (Abblasen in einen Behälter mit dem Fremdgedruck  $pFG$ )  $pX = pFG$ . Im letzten Fall wird zusätzlich die Umrechnung der auf Atmosphärendruck bezogenen Dichte vorgenommen.

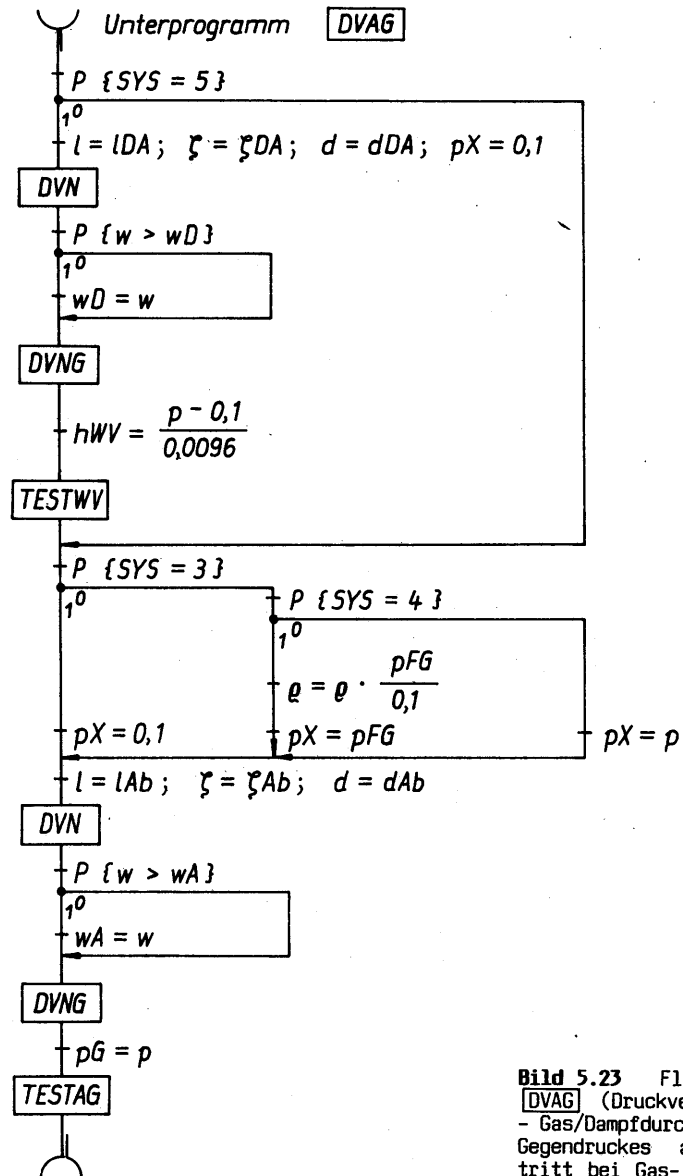


**Bild 5.22** Flußplan des Unterprogramms **DVAW** (Druckverlust des Abblasesystems - Wasserdurchsatz) zur Berechnung des Gegendruckes am Sicherheitsventilaustritt bei Wasserbeaufschlagung

#### **DVAND** Druckverlust des Abblasesystems bei Naßdampfabströmung

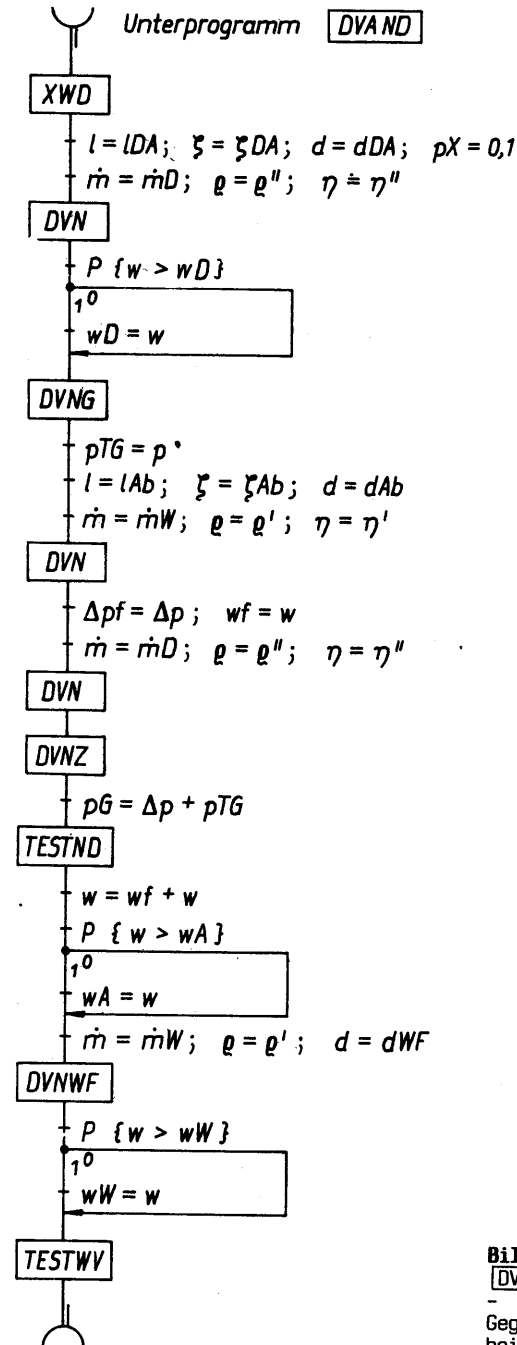
Näherungsweise werden alle Zustands- und Stoffwerte des im Bild 5.24 vorgestellten Algorithmus auf Atmosphärendruck und der zugehörigen Siedetemperatur bezogen. Vorangestellt ist die Ermittlung des Dampfgehaltes  $xWD$  mittels **XWD**. Es schließt sich die Berechnung des Gegendruckes im Trenngefäß  $pTG$  mit Hilfe der Unterprogramme **DVN** und **DVNG** an, die auf das Dampf-Abblaserohr DA angewendet werden. Zur Druckverlustbestimmung  $\Delta p$  in der Abblaseleitung Ab sind **DVN** - für jede Phase - und **DVNZ** zu aktivieren. Der Gesamtgedruck  $pG$  und die Geschwindigkeit des Zweiphasengemisches  $w$  berechnen sich nach den Gln. (5.26) und (5.4a). Schließlich wird das Wasser-Fallrohr mittels **DVNWF** untersucht. Im Ergebnis folgen die Geschwindigkeit  $w$  sowie die Höhe der erforderlichen Wasservorlage  $hWV$ .

In den Unterprogrammen **DVAW**, **DVAG** und **DVAND** werden außer den vorgestellten Berechnungen noch die lastabhängigen, maximalen Gegendrucke für die Medien Wasser, Gas/



**Bild 5.23** Flußplan des Unterprogramms **DVAG** (Druckverlust des Abblasesystems - Gas/Dampfdurchsatz) zur Berechnung des Gegendruckes am Sicherheitsventilaustritt bei Gas- bzw. Dampfbeaufschlagung

Dampf und Naßdampf unter Verwendung von **TESTAF**, **TESTAG** sowie **TESTND** bestimmt und die maximale Höhe der Wasservorlage mit **TESTWV** ermittelt. Zusätzlich erfolgt die Selektierung der Maximalgeschwindigkeiten im Wasser-Fallrohr  $wW$  und Dampf-Abblaserrohr  $wD$  sowie in der Abblaseleitung bei Wasserdurchsatz  $wAW$  bzw. bei Gas- oder Dampfbeaufschlagung  $wA$ .



**Bild 5.24** Flußplan des Unterprogramms **DVAND** (Druckverlust des Abblasesystems - Naßdampfdurchsatz) zur Berechnung des Gegendruckes am Sicherheitsventilaustritt bei Naßdampfbeaufschlagung

### 5.4.3. Beispiele

Die in den Abschnitten 5.2.3. und 5.3.3. manuell bearbeiteten Beispiele 1 bis 3 sind mit den vorgestellten Algorithmen erneut abgearbeitet worden. Die Ergebnisse sind den nachfolgenden Rechnerprotokollen zu entnehmen:

#### Beispiel 1 (Wasserabströmung)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E | Zuleitung und Abblasesystem      | Bild 1 |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------|
| ZULEITUNG ZU SV1:                   |                                  |        |
| KONTROLLE DER EINGABEWERTE:         |                                  |        |
| Länge                               | lZ = 8.00 m                      |        |
| Widerstandsbeiwert                  | ZetaZ = 1.50                     |        |
| Innendurchmesser                    | dZ = 0.0512 m                    |        |
| ERGEBNISSE:                         |                                  |        |
| Druckverlust in der Zuleitung:      | DP - vorh. = 0.015296 MPa        |        |
|                                     | DP - zul. = 0.016500 MPa         |        |
| Wassergeschwindigkeit               | wW = 2.57 m/s (Grenzwert: 3 m/s) |        |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E                                       | Zuleitung und Abblasesystem | Bild 2           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------|
| Rohrrauhigkeit des Abblasesystems $\epsilon_A = 0.00005$ m                |                             |                  |
| ABBLASESYSTEM NACH SV1: Es ist Wasser abzuführen !                        |                             |                  |
| KONTROLLE DER EINGABEWERTE:                                               |                             |                  |
| Es wird in ein geschlossenes System abgeblasen !                          |                             | SYS = 2          |
| Fremdgedruck                                                              | pFG = 0.2900 MPa            |                  |
| Länge                                                                     | lAb = 2.50 m                |                  |
| Widerstandsbeiwert                                                        | ZetaAb = 2.0                | } Abblaseleitung |
| Innendurchmesser                                                          | dAb = 0.0512 m              |                  |
| ERGEBNISSE:                                                               |                             |                  |
| Gegendruck am Ventilaustritt: - Flüssigkeitsabströmung pBf = 0.2997 MPa   |                             |                  |
| Wassergeschwindigkeit in Abblaseleitung wAW = 2.57 m/s (Grenzwert: 3 m/s) |                             |                  |

#### Beispiel 2 (Sattdampfabströmung)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E | Zuleitung und Abblasesystem        | Bild 1 |
|-------------------------------------|------------------------------------|--------|
| ZULEITUNG ZU SV1:                   |                                    |        |
| KONTROLLE DER EINGABEWERTE:         |                                    |        |
| Länge                               | lZ = 10.00 m                       |        |
| Widerstandsbeiwert                  | ZetaZ = 0.82                       |        |
| Innendurchmesser                    | dZ = 0.0818 m                      |        |
| ERGEBNISSE:                         |                                    |        |
| Druckverlust in der Zuleitung:      | DP - vorh. = 0.032400 MPa          |        |
|                                     | DP - zul. = 0.036000 MPa           |        |
| Gas-/Dampfgeschwindigkeit           | wD = 57.08 m/s (Grenzwert: 60 m/s) |        |

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E                                           |              | Zuleitung und Abblasesystem | Bild 2           |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------|------------------|
| Rohrrauhigkeit des Abblasesystems $\epsilon_A = 0.00010$ m                    |              |                             |                  |
| ABBLASESYSTEM NACH SV1: Es ist Wasserdampf abzuführen !                       |              |                             |                  |
| KONTROLLE DER EINGABEWERTE:                                                   |              |                             |                  |
| Es wird in die Atmosphäre abgeblasen !                                        |              |                             | SYS = 3          |
| Länge                                                                         | lAb = 10.00  | m                           | } Abblaseleitung |
| Widerstandsbeiwert                                                            | ZetaAb = 2.4 |                             |                  |
| Innendurchmesser                                                              | dAb = 0.1500 | m                           |                  |
| ERGEBNISSE:                                                                   |              |                             |                  |
| Gegendruck am Ventilaustritt: - Gasabströmung                                 |              | pGg = 0.1381 MPa            |                  |
| Gas-/Dampfgeschwindigkeit in Abblaseleit. wA = 221.68 m/s (Grenzwert:250 m/s) |              |                             |                  |

#### Beispiel 3 (Naßdampfabströmung)

| S I C H E R H E I T S V E N T I L E     | Zuleitung und Abblasesystem        | Bild 1 |
|-----------------------------------------|------------------------------------|--------|
| ZULEITUNG ZU SV1:                       |                                    |        |
| KONTROLLE DER EINGABEWERTE:             |                                    |        |
| Länge                                   | lZ = 15.00 m                       |        |
| Widerstandsbeiwert                      | ZetaZ = 1.50                       |        |
| Innendurchmesser                        | dZ = 0.1000 m                      |        |
| ERGEBNISSE:                             |                                    |        |
| Druckverlust in der Zuleitung:          | DP - vorh. = 0.012510 MPa          |        |
|                                         | DP - zul. = 0.022500 MPa           |        |
| Geschwindigkeit des Zweiphasengemisches | wND = 7.17 m/s (Grenzwert: 40 m/s) |        |

|                                                                     |                |                                     |         |
|---------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------|---------|
| S I C H E R H E I T S V E N T I L E                                 |                | Zuleitung und Abblasesystem         | Bild 2  |
| Rohrrauhigkeit des Abblasesystems $\epsilon_A = 0.00010$ m          |                |                                     |         |
| ABBLASESYSTEM NACH SV1: Es sind Wasser und Wasserdampf abzuführen ! |                |                                     |         |
| KONTROLLE DER EINGABEWERTE:                                         |                |                                     |         |
| Es wird in die Atmosphäre abgeblasen !                              |                |                                     | SYS = 5 |
| Länge                                                               | lAb = 2.00 m   | } Abblaseleitung                    |         |
| Widerstandsbeiwert                                                  | ZetaAb = 1.2   |                                     |         |
| Innendurchmesser                                                    | dAb = 0.1500 m |                                     |         |
| Innendurchmesser                                                    | dWF = 0.1500 m | } Wasser-Fallrohr                   |         |
| Länge                                                               | lDA = 5.00 m   |                                     |         |
| Widerstandsbeiwert                                                  | ZetaDA = 2.0   | } Dampf-Abblaserohr                 |         |
| Innendurchmesser                                                    | dDA = 0.2070 m |                                     |         |
| ERGEBNISSE:                                                         |                |                                     |         |
| Gegendruck am Ventilaustritt: - Naßdampfabströmung                  |                | pGfg = 0.1173 MPa                   |         |
| Höhe der Wasservorlage                                              |                | hWV = 0.20 m                        |         |
| Geschwindigkeit im Wasser- Fallrohr                                 |                | wW = 0.29 m/s (Grenzwert: 1 m/s)    |         |
| Geschwindigkeit im Dampf- Abblaserohr                               |                | wD = 51.68 m/s (Grenzwert: 100 m/s) |         |
| Gas-/Dampfgeschwindigkeit in Abblaseleit.                           |                | wA = 98.71 m/s (Grenzwert: 250 m/s) |         |

## 6. Anhang

### 6.1. Zustands- und Stoffwertmodule

**[RHOH]**

Dichte des Wassers nach /7/ für  $t = 10\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$\rho_W = 1001,506 - 0,09418257 t - 0,0036778 t^2 + 3,667823 \cdot 10^{-6} t^3 \quad \text{in kg/m}^3 \quad (\text{A1})$$

**[RHOG]**

Dichte der Luft und des Stickstoffs (Mittelwert:  $-R = 290\text{ J/(kg K)}$ )

$$\rho_G = \frac{10^6 p}{290 (t + 273)} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (\text{A2})$$

mit  $p$  in MPa und  $t$  in °C.

**[RHOS]**

Dichte des gesättigten Wasserdampfes für  $p = 0,1\text{ MPa} \dots 1,6\text{ MPa}$

$$\rho_S = 5,1464 p^{0,95} + 0,0168 (p-1) + 0,007 (p-1)^2 \quad \text{in kg/m}^3 \quad (\text{A3})$$

**[RHOH]**

Dichte des überhitzten Wasserdampfes nach /7/ für  $t = 50\text{ °C}$  oder  $t_S \dots 400\text{ °C}$  und  $p = 0,01\text{ MPa} \dots 2\text{ MPa}$

$$\rho_H = \frac{1}{v_H} \quad (\text{A4})$$

mit

$$v_H = 4,616586 \cdot 10^{-4} \frac{T}{p} - 4,003723 \cdot 10^5 T^{-2,82} - p^2 (1,359989 \cdot 10^{34} T^{-14} + 7,211688 \cdot 10^{80} T^{-31,6}) \quad \text{in m}^3/\text{kg} \quad (\text{A5})$$

und

$$T = (t + 273)\text{ K.}$$

**[RHOH1]\***

Dichte des überhitzten Wasserdampfes bei  $p = 0,1\text{ MPa}$  für  $h_H = 2676\text{ kJ/kg} \dots 3100\text{ kJ/kg}$

$$\rho_{H01} = (-4,62 + 2,36 \cdot 10^{-3} h_H)^{-1} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (\text{A5a})$$

**[TS]**

Sättigungstemperatur des Wassers nach /7/ für  $p = 0,1\text{ MPa} \dots 1,6\text{ MPa}$

$$t_S = -28,841 (\ln p^*) + 7,0525 (\ln p^*)^2 - 0,52218 (\ln p^*)^3 + 0,016732 (\ln p^*)^4 - 0,22 \quad \text{in °C} \quad (\text{A6})$$

mit

$$p^* = p \cdot 10^6 \text{ Pa.}$$

**[PS]**

Sättigungsdruck des Wassers nach /7/ für  $t = 100\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$p_S = 0,611 \cdot 10^{-3} \exp(7,142753 \cdot 10^{-2} t - 2,600931 \cdot 10^{-4} t^2 + 6,432223 \cdot 10^{-7} t^3 - 7,410232 \cdot 10^{-10} t^4) \quad \text{in MPa} \quad (\text{A6a})$$

**[HS]\***

Spezifische Enthalpie des Satttdampfes nach /7/ für  $t = 10\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$h_S = 2,500757 \cdot 10^3 + 1,819057 t + 6,477733 \cdot 10^{-4} t^2 - 1,243493 \cdot 10^{-5} t^3 \quad \text{in kJ/kg} \quad (\text{A7})$$

**[HH]\***

Spezifische Enthalpie des Heißdampfes nach /7/ für  $t = 50\text{ °C}$  oder  $t_S \dots 400\text{ °C}$  und  $p = 0,01\text{ MPa} \dots 2\text{ MPa}$

$$h_H = 1,988364 \cdot 10^3 + 1,904792 T - 1,915846 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,002079 \cdot 10^{-7} T^3 - 1,528778 \cdot 10^9 p T^{-2,82} - p^3 (6,797117 \cdot 10^{37} T^{-14} + 7,833161 \cdot 10^{84} T^{-31,6}) \quad \text{in kJ/kg} \quad (\text{A8})$$

mit

$$T = (t + 273)\text{ K.}$$

**[HW]**\*

Spezifische Enthalpie des Wassers nach /7/ für  $t = 10\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$  und  $p \leq 2\text{ MPa}$

$$h_W = -1,2721 \cdot 10^{-2} + 4,206911 t - 6,078348 \cdot 10^{-4} t^2 + 4,394587 \cdot 10^{-6} t^3 + p \left( 1 - \frac{t}{240} \right) \quad \text{in kJ/kg} \quad (\text{A9})$$

**[HWS]**\*

Spezifische Enthalpie des Siedewassers nach /7/ für  $t = 10\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$h_{WS} = -1,2721 \cdot 10^{-2} + 4,206911 t - 6,078348 \cdot 10^{-4} t^2 + 4,394587 \cdot 10^{-6} t^3 \quad \text{in kJ/kg} \quad (\text{A10})$$

**[DHV]**\*

Spezifische Verdampfungsenthalpie nach /7/ für  $t = 10\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$\Delta h_V = 2,500781 \cdot 10^3 - 2,389204 t + 1,275304 \cdot 10^{-3} t^2 - 1,686910 \cdot 10^{-5} t^3 \quad \text{in kJ/kg} \quad (\text{A11})$$

**[CW]**\*

Spezifische Wärmekapazität des Wassers nach /7/ für  $t = 30\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$c_W = 4,174785 + 1,785308 \cdot 10^{-5} t - 5,097403 \cdot 10^{-7} t^2 + 4,216721 \cdot 10^{-8} t^3 \quad \text{in kJ/(kg K)} \quad (\text{A12})$$

**[DV/DT]**

Differentialquotient  $dv/dt$  des Wassers nach /7/ für  $t = 30\text{ °C} \dots 120\text{ °C}$

$$DVDT = \frac{dv}{dt} = 10^{-6} \exp(-2,152147 + 4,171434 \cdot 10^{-2} t - 3,324521 \cdot 10^{-4} t^2 + 1,064482 \cdot 10^{-6} t^3) \quad \text{in m}^3/(\text{kg K}) \quad (\text{A13})$$

**[ETAW]**

Dynamische Viskosität des Wassers nach /7/ für  $t = 10\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$\eta_W = (556,0626 + 19,62072 t + 0,1292435 t^2 - 2,713145 \cdot 10^{-4} t^3)^{-1} \quad \text{in kg/(s m)} \quad (\text{A14})$$

**[ETAG]**

Dynamische Viskosität der Luft nach /7/ für  $t = -20\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$

$$\eta_G = 1,705568 \cdot 10^{-5} + 4,511012 \cdot 10^{-8} t - 8,766234 \cdot 10^{-12} t^2 - 3,382035 \cdot 10^{-15} t^3 \quad \text{in kg/(s m)} \quad (\text{A15})$$

Zur Berechnung der REYNOLDS-Zahlen kann  $\eta_G$  näherungsweise auch für **Stickstoff** verwendet werden.

**[ETAH]**

Dynamische Viskosität des Wasserdampfes nach /7/ für  $t = 50\text{ °C}$  oder  $t_S \dots 400\text{ °C}$  und  $p = 0,01\text{ MPa} \dots 2\text{ MPa}$

$$\eta_H = 9,054339 \cdot 10^{-6} + 2,941217 \cdot 10^{-8} t + 4,021091 \cdot 10^{-11} t^2 - 4,379615 \cdot 10^{-14} t^3 - 10^{-6} p \exp(-0,0071 t) \quad \text{in kg/(s m)} \quad (\text{A16})$$

**[ETAH01]**\*

Dynamische Viskosität des Wasserdampfes bei  $p = 0,1\text{ MPa}$  für  $h_H = 2676\text{ kJ/kg} \dots 3100\text{ kJ/kg}$

$$\eta_{H01} = -4,18 \cdot 10^{-5} + 2,02 \cdot 10^{-8} h_H \quad \text{in kg/(s m)} \quad (\text{A16a})$$

**\* Beachte!**

In den Datenflußplänen sind alle kalorischen Größen mit der Einheit J zu verwenden.

## 6.2. Wärmeleistung und Wärmedurchgangskoeffizient

Zur Beurteilung des Lastfalles "Volumenexpansion durch Wärmezufuhr" (Abschnitt 2.7.) ist die Kenntnis des Wärmestromes  $\dot{Q}$  bzw. des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  erforderlich.

Nach /15/ ist zur Bemessung der sicherheitstechnischen Ausrüstung einschließlich seiner Elemente die **"Wärmenennleistung"** zu verwenden.

Bei Kesseln wird darunter die vom Hersteller **vorgegebene, maximale Dauerleistung** verstanden. Bei **Wärmeübergabeanlagen** handelt es sich definitionsgemäß um die Wärmeleistung, für die die Anlage **bemessen** sowie **gebaut** wurde und mit der sie **dauernd betrieben** werden kann.

Aus sicherheitstechnischer Sicht befriedigt es jedoch nicht, die **Wärmenennleistung** unverändert als **Bemessungsgrundlage** zu verwenden. Da es sich um einen im Dauerbetrieb einzuhaltenden Garantiewert handelt, liegt er selbstverständlich niedriger als die Maximalleistung.

So wird sich beispielsweise bei einem Kessel die Angabe auf den qualitativ ungünstigsten Brennstoff des einsetzbaren Brennstoffbandes beziehen. Bei der Auslegung eines Wärmeübertragers ist eine bestimmte Heizflächenverschmutzung, die im Neuzustand oder nach einer Reinigung nicht existiert, berücksichtigt. Zudem enthalten die Apparate- und Anlagenbemessung erfahrungsgemäß subjektive Zuschläge, die durch die Wahl der nächst größeren Normgrößen mitunter beträchtlich steigen.

Zur Ermittlung der maximalen Wärmeleistung oder des maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten werden nachfolgend zwei verschiedene Wege vorgestellt.

Abweichungen der Eintrittstemperaturen und Medienströme infolge von Regelungstoleranzen oder zu hoch in Rechnung gestellten hydraulischen Widerständen können im Havariefall weitere Leistungserhöhungen bewirken. Diese Einflüsse finden jedoch bei Abarbeitung der speziellen Lastfälle Beachtung.

### I. Umrechnung der Herstellerangaben

Die Wärmenennleistung  $\dot{Q}_N$  sollte nach entsprechender Beurteilung der möglichen Einflüsse und ggf. nach Rücksprache mit dem Hersteller des wärmetechnischen Apparates für die Bemessung der Sicherheitsventile um 10 bis 30 % erhöht werden.

Damit ist für Heizkessel eine Wärmeleistung

$$\dot{Q} = (1,1 \dots 1,3) \dot{Q}_N \quad (\text{A17})$$

anzunehmen.

Für Wärmeübertrager gilt ausgehend von der Bilanzgleichung

$$\dot{Q}_N = (kA)_N \Delta t_{m,N} = \dot{m}_N c \Delta t_N = \dot{C}_N \Delta t_N \quad (\text{A18})$$

für den komplexen Wärmedurchgangskoeffizienten

$$kA = (1,1 \dots 1,3)(kA)_N = (1,1 \dots 1,3) \dot{C}_N \frac{\Delta t_N}{\Delta t_{m,N}} \quad (\text{A19})$$

Es bedeuten:

- A Heizfläche
- k Wärmedurchgangskoeffizient
- $\dot{m}$  Massestrom des Heiz- oder Kühlmediums
- c Spezifische Wärmekapazität des Massestromes  $\dot{m}$
- $\Delta t$  Positive Temperaturdifferenz des Massestromes  $\dot{m}$  zwischen Ein- und Austritt ( $\Delta t = |t_{\text{Eintritt}} - t_{\text{Austritt}}|$ )
- $\Delta t_m$  Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz
- $\dot{C}$  Wärmekapazitätsstrom ( $\dot{C} = \dot{m} c$ ).

Der Index N deutet auf die Nennparameter hin.

### II. Theoretische Ermittlung

Für mehrstufig arbeitende Apparate - z.B. kombinierte Kondensatoren und Kondensatorkühler -, deren Gesamtleistung nicht detailliert ist, oder für Apparate, deren Herstellerangaben fehlen bzw. für den Einsatzfall nicht zutreffen, ist die analytische Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten erforderlich.

In Abhängigkeit der Heizflächenform gelten:

#### Ebene Heizfläche

$$k = \left[ \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{1}{\alpha_a} \right]^{-1} \quad (\text{A20})$$

#### Rohrheizfläche

$$k_i = \left[ \frac{d_i}{(d_i - 2\delta_i)\alpha_i} + \frac{d_i}{2\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_i - 2\delta_i} + \frac{d_i}{2\lambda} \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_i}{2\lambda_a} \ln \frac{d_a + 2\delta_a}{d_a} + \frac{d_i}{(d_a + 2\delta_a)\alpha_a} \right]^{-1} \quad (\text{A21})$$

Im einzelnen bedeuten:

- $\alpha_i$  Wärmeübergangskoeffizient auf der Innenseite
- $\alpha_a$  Wärmeübergangskoeffizient auf der Außenseite
- $\delta_i$  Dicke eines inneren Belages
- $\delta_a$  Dicke eines äußeren Belages
- $\lambda_i$  Wärmeleitfähigkeit eines inneren Belages
- $\lambda_a$  Wärmeleitfähigkeit eines äußeren Belages
- $\delta$  Materialdicke der Heizfläche
- $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit der Heizfläche
- $d_i$  Innendurchmesser
- $d_a$  Außendurchmesser
- $k$  Wärmedurchgangskoeffizient einer ebenen Heizfläche
- $k_i$  Wärmedurchgangskoeffizient eines Rohres, bezogen auf  $d_i$ .

Die Wärmeübergangskoeffizienten werden für die Innen- und Außenseite getrennt nach den aus der Ähnlichkeitstheorie abgeleiteten Approximationen unter Beachten der spezifischen Randbedingungen beispielsweise unter Verwendung von /16, 34/ berechnet. Im Sinne der Sicherheit sind nahezu saubere Oberflächen anzunehmen.

## 7. Literaturverzeichnis

- /1/ BOZÓKI, G.: Überdrucksicherungen für Behälter und Rohrleitungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1986
- /2/ KEMNITZ, R.; NESTKE, C.: Untersuchung zur Kavitation und Sattwasserströmung in Armaturen. Technische Information Armaturen (1985) 3/4
- /3/ TGL 32903/02: Behälter und Apparate, Festigkeitsberechnung. 07/87
- /4/ TGL 32898/02: Dampf- und Heißwasserkessel, Festigkeitsberechnung. 02/79
- /5/ TGL 22160/01: Rohrleitungen aus Stahl, Festigkeitsberechnung. 04/84
- /6/ GLÜCK, B.: Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1985
- /7/ GLÜCK, B.: Zustands- und Stoffwerte, Verbrennungsrechnung (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1987
- /8/ GLÜCK, B.: Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung, Druckverluste (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1988
- /9/ GLÜCK, B.: Anmerkungen zum Standard MAN 803.07/01 (IEC 534-2-1) - Durchflußmengenmittlung für inkompressible Fluide bei Stellarmaturen. Stadt- und Gebäudetechnik (1988) 2
- /10/ IEC 534-2-1: Industrial-process control valves, Flow capacity, Sizing equations for incompressible fluid flow under installed conditions. 1978
- /11/ GLÜCK, B.: Anmerkungen zum Standard MAN 803.07/02 (IEC 534-2-2) - Durchflußmengenmittlung für kompressible Fluide bei Stellarmaturen. Stadt- und Gebäudetechnik (1988) 3
- /12/ IEC 534-2-2: Industrial-process control valves, Flow capacity, Sizing equations for compressible fluid flow under installed conditions. 1980
- /13/ STACHS, H.: Das Durchflußverhalten flüssigkeitsdurchströmter Armaturen bei auftretender Ausdampfung. Technische Information Armaturen (1976) 2/3
- /14/ KECKE, H.J.: Berechnung der Mehrstufendrosselung bei Gasdurchsatz. Technische Information Armaturen (1982) 3

- /15/ TGL 23043/01: Sicherheitstechnische Ausrüstung für den Schutz von Heizwasseranlagen. 10/88
- /16/ GLÜCK, B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1989
- /17/ WBV-AV2: Werkstoff- und Bauvorschriften für Anlagen der Dampf- und Drucktechnik, Ausrüstung, Sicherheitsventile. 1989
- /18/ WBV-AV1: Werkstoff- und Bauvorschriften für Anlagen der Dampf- und Drucktechnik, Ausrüstung, Allgemeine Ausrüstungsvorschriften. 1985
- /19/ HÄFELE, C.H.: Absperr- und Sicherheitsarmaturen. Industriearmaturen - Jahrbuch 1.Ausgabe. Essen: Vulkan Verlag 1986
- /20/ AD-Merkblatt A 2: Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung - Sicherheitsventile -. Essen: Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine 1980  
DIN 3320 Teil 1: Sicherheitsventile; Sicherheitsabsperrventile; Begriffe, Größenbemessung, Kennzeichnung. 09/84
- /21/ Sicherheitsventile - Das Handbuch für Planer und Anwender. Werksunterlagen der Fa. Bopp & Reuther. Mannheim:1982
- /22/ RICHTER, H.: Sicherheitsventile und Sicherheitseinrichtungen für konventionelle und nukleare Kraftwerke. Industriearmaturen - Jahrbuch 1.Ausgabe. Essen: Vulkan Verlag 1986
- /23/ DZUNG, L.S.; GYARMATHY, G.: Kritische Durchfluß-Stromdichte in Zweiphasenströmung. Brown-Boveri Mitteilungen (1978) 1
- /24/ OBERMEIER, E.: Thermodynamik kritischer Massestromdichten - Einkomponenten - Zweiphasenströmung. Habilitationsschrift Universität Siegen 1981
- /25/ PANA, P.: Berechnung der stationären Massestromdichte von Wasserdampfgemischen und der auftretenden Rückstoßkräfte. Institut für Reaktorsicherheit (TÜV), IRS-W-24, 1976
- /26/ Sicherheitsventile mit DIN- und ANSI-Anschlüssen. Werksunterlagen der Fa. Rheinische Armaturen- und Maschinenfabrik Sempell. Korschenbroich: 1988
- /27/ VdTÜV-Merkblatt Sicherheitsventil 100/2 "Bemessungsvorschlag für Sicherheitsventile für Gase im flüssigen Zustand". Vereinigung Technischer Überwachungsvereine e.V. Essen
- /28/ KEMNITZ, R.; NESTKE, C.: Auslegung von Sicherheitsventilen in Heißwasseranlagen. Stadt- und Gebäudetechnik (1989) 5

- /29/ SCHMIDT, E.: VDI-Wasserdampfatafeln. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; München: Oldenbourg-Verlag 1968
- /30/ SCHMIDT, E.; GRIGULL, U.: Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf in SI-Einheiten. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; München: Oldenbourg-Verlag 1982
- /31/ RIWKIN, S.L.; ALEXANDROW, A.A.; KREMEWSKAJA, E.A.: Thermodynamische Ableitungen für Wasser und Wasserdampf (russ.). Moskau: Energia 1977
- /32/ BARICH, F.; STREME, J.: Stand der Funktionsprüfung an Sicherheitsventilen auf Leistungsprüfständen. Industriearmaturen - Jahrbuch 1. Ausgabe. Essen: Vulkan Verlag 1986
- /33/ ELSNER, N.; FISCHER, S.; KLINGER, J.: Thermo-physikalische Stoffeigenschaften von Wasser. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982
- /34/ VDI-Wärmeatlas. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1984

## 8. Sachwörterverzeichnis

- Abblasedruck 10
- Abblaseleitung 243ff., 253ff., 258
- Bemessung 253ff.
- Abblasen
- Flüssigkeit 193ff.
- Gase/Dämpfe 195ff.
- Heißwasser 201ff.
- einheitliches Phasenmodell 204
- getrenntes Phasenmodell 202
- Naßdampf 205
- Abblasesysteme 243, 245, 258
- Flüssigkeit 259
- Gase/Dämpfe 259
- Heißwasser/Naßdampf 261
- Absicherung
- Grenzen 147ff.
- Mitteldruck 147
- Vorlaufdruck 147
- Absicherungsvarianten 16f., 25, 29
- Anlage 7, 10, 132
- Anlagendruck
- maximaler 11, 140
- zulässiger 14, 29
- Anlagenschaltungen, s. Lastzuordnung
- Anlagensicherung 132
- Anlagenteil 7, 10, 132, 163
- Anschlußorte 133ff.
- Anspruchdruck 7, 10f., 14ff., 26ff., 29, 140ff., 188
- Festlegung 140, 146
- Genauigkeit 181
- Anspruchgenauigkeit, Sicherheitsventile 180f.
- Arbeitsdruckdifferenz 141, 180f., 190
- Armaturenkenwert
- $k_v$  58, 62, 72, 157f.
- $x_T$  62, 64, 72
- Atmosphärendruck 188, 202
- Auffangsysteme 243
- Ausdehnung, Volumenexpansion 90ff.
- Ausflußbeiwert, Rohrbruch 78, 86
- Ausflußfunktion 192, 196ff.
- Ausflußziffer 190ff., 203f.
- Interpolation 233
- Phasenwandel 204, 207
- Austrittsdruck 188, 190
- Auswahlalgorithmus, Sicherheitsventile 217ff.
- Begrenzungsschaltungen 132
- Behälter, Absicherungsvarianten 16f., 25, 29
- Behälterfüllung 30
- Behältertemperaturen 30
- Belastung, Sicherheitsventil 7
- Berechnungsdruck 11, 140
- Berechnungsmodell, Vergleich 207ff.
- Betriebsdruckbereich 143
- Betriebstemperatur 145
- Bezeichnungen 7
- Blenden 62
- Dampf-Abblaserrohr 255, 258
- Dampfgehalt 53, 192, 202
- Datei
- Behälter 31, 217
- Lastannahmen 172f., 217, 223
- Sicherheitsventile 217ff.
- Ventilquerschnitt 217, 222
- Datenflußplan, s. Programm

Dichtheit, Sicherheitsventile 180  
 Differenzdruckverhältnis 62, 86  
 Drossleinrichtung 64  
 Charakteristik 72  
 Drosselstelle 19, 61ff.  
 Druck, kritischer 202, 204  
 Druckanstiegsmethode 180  
 Druckhaltungen 164ff.  
 Druckmedienzufluß, Lastfall 61ff.  
 Druckmedium 16  
 Art, Charakteristik 30  
 Druckminderer 62  
 Druckmittelbeiwert 192, 199f.  
 Druckrückgewinnfaktor 50  
 Druckschaubild 136ff.  
 Druckverhältnis  
 kritisches 196, 198  
 Sicherheitsventil 218  
 Druckverlauf  
 geodätischer 136  
 hydraulischer 136  
 Druckverlust 14  
 Berechnung 246ff.  
 Zuleitung, zulässig 245  
 Durchfluß, kritischer 48  
 Durchflußbegrenzung 50  
 Durchflußbeiwert 62, 64  
 Eigengegendruck 253  
 zulässiger 253f.  
 Einfriergefahr 243  
 Einstelldruck 254  
 Entspannungstopf 255f.  
 Entwässerung 25, 243, 258  
 Erosion 195  
 Fallrohr 254f., 258  
 Faltenbalg 181, 244  
 Federkraft 182  
 Flashing 48, 201  
 critical 48, 201  
 Flußplan, s. Programm  
 Fremdgedruck 244  
 zulässiger 253f.  
 Gaskonstante 192, 198  
 Gegendruck 7, 190, 230  
 Nachweis 254ff.  
 zulässiger 253f.  
 Genauigkeit, Ansprechdruck 180f.  
 Gesamtsicherungskonzept 10, 132  
 Geschwindigkeit  
 kritische 197  
 maximale 246, 255  
 Zweiphasengemisch 248  
 Grenzdruk 11  
 Grenzen, Absicherung 147ff.  
 Haube, Sicherheitsventil 181  
 Heizmedium, Art 108  
 Hochhubventil 182  
 Hubbegrenzung 182, 186  
 Hubhilfe 182f.  
 Hubhöhe, Sicherheitsventil 182  
 Hysterese 183, 185  
 Installationsgrundsätze, Sicherheits-  
 ventile 242ff.  
 Isentropenexponent 62, 64, 86, 192, 198  
 Kavitation 48, 201  
 Kennlinie  
 Pumpen 40, 158  
 Sicherheitsventile 183ff.  
 Kühlgrube 243, 255  
 Lastannahme 7, 10, 13ff.  
 Lastanpassung 185  
 Lastfall 7, 10  
 Dampfzustrom  
 Rohrbruch 85ff.  
 Druckmedienzustrom  
 Drosselstelle 61ff.

Volumenexpansion, Wärmezufuhr 90ff.  
 abgesperrter Behälter  
 Erwärmung 94  
 Verdampfung 100  
 geschlossener Kreislauf 97  
 teilabgesperrter Behälter 101  
 Wasserzustrom  
 Pumpe 34ff.  
 Pumpe-Stellventil-Komb. 156ff.  
 Rohrbruch 77ff.  
 Stellventil 47ff.  
 zusätzlicher 172  
 Lastfall-Kurzzeichen 170  
 Lastzuordnung 7, 10, 132ff., 163ff.  
 typische Schaltungen 163ff.  
 dyn. Druckhaltung 166f.  
 nachgeschaltete Druckhaltung 169  
 stat. Enddruckhaltung 165  
 stat. Saugdruckhaltung 164  
 stat.-dyn. Druckhaltung 168  
 Leckraten, Sicherheitsventile 180f.  
 LOCKHART-MARTINELLI-Parameter 247f.  
 Massestrom  
 Bezeichnungen 15  
 Lastfall 34ff.  
 Sicherheitsventile  
 Flüssigkeit 194  
 Gase/Dämpfe 198  
 Heißwasser 204  
 Naßdampf 207  
 Massestromdichte 204ff.  
 Mehrstufendrosselung 65  
 Mischbehälter 243, 255  
 Mischvorwärmer 22  
 Mitteldruck 138, 143, 145  
 Mitteldruckhaltung 138  
 Niederhubventil 182  
 Normaldruckbereich 11, 141, 143, 145f.  
 Normalsicherheitsventil 186  
 Öffnungscharakteristik 183  
 Öffnungsdruck 7, 10, 17, 188f.  
 Öffnungsdruckkoeffizient 17, 30, 189  
 Öffnungskraft 182  
 Phasenwechsel  
 Beheizung 24, 92  
 Entspannung 19, 48, 201  
 Prämissen  
 Sicherheitsventilanordnung 24  
 Sicherungskonzept 132  
 Programm, Hauptprogramm  
 Lastzuordnung (LZO) 170ff.  
 Nachrechnung, Anschlußsysteme (NAS)  
 268ff.  
 Abblasesystem 279  
 Zuleitung 268  
 Sicherheitsventilbemessung (SVB)  
 223ff.  
 Programm, Unterprogramm  
 Abblasestrom  
 Druckminderer (ABS-M) 68ff.  
 Heizung (ABS-H) 107ff.  
 Pumpe-Stellventil-Komb. (ABS-PV)  
 158ff.  
 Pumpenzufluß (ABS-P) 40ff.  
 Rohrbruch (ABS-R) 80ff.  
 Rohrbruch/Dampf (ABS-RD) 87ff.  
 Ventilzufluß (ABS-V) 55ff.  
 Ansprechdruck (PA) 26ff.  
 Druckverlust, Abblasesystem  
 Gasabströmung (DVAG) 288  
 Naßdampfabströmung (DVAND) 289  
 Wasserabströmung (DVAW) 288  
 Druckverlustnachrechnung (DVN) 284  
 Gasabströmung (DVNG) 286  
 Wasser-Fallrohr (DVNWF) 286  
 Zweiphasenströmung (DVNZ) 287  
 Sicherheitsventilauswahl  
 Querschnittsermittlung (SVB-) 217, 235ff.

Proportionalsicherheitsventil 183  
 Pumpenkennlinie 40, 158  
     Koeffizienten 40, 44, 158  
 Pumpenzufluß, Lastfall 34ff., 156ff.  
  
 Querschnitt, Sicherheitsventil 188  
     Flüssigkeitsabströmung 194  
     Gase/Dämpfe 198  
     Heißwasser 203f.  
     Naßdampf 207  
  
 Realgasfaktor 198  
 Rechenprogramm, s. Programm  
 Rohrbruch, Lastfall 77ff., 85ff.  
 Rohrrauhigkeit 246  
 Rohrreibungsbeiwert 246f.  
  
 Saugdruckhaltung 136  
 Schalldämpfer 243  
 Schallgeschwindigkeit 197  
 Schaltungen, s. Lastzuordnung  
 Schließdruck 7, 10, 17, 141, 183, 188f.  
 Schließdruckkoeffizient 17, 189  
 Separation 20f.  
 Sicherheitsbegrenzer 11  
 Sicherheitsventile 180ff.  
     Abblasesstrom 193ff.  
     Abblasesysteme 243f., 258  
     Anordnung 24  
     Ansprechgenauigkeit 180f.  
     Arbeitsdruckdifferenz 180f., 190  
     Ausflußziffer 190ff., 203f., 207, 233  
     Belastungsart 181  
     Bemessung 187ff.  
     Berechnungsgrößen 187ff.  
     Dichtheit 180  
     Doppelanordnung 7, 24  
     Einbaubedingungen 242ff.  
     federbelastet 181  
     Funktionsweise 180ff.  
     Gehäusegestaltung 181  
     hilfsgesteuerte 182  
     Hochhubventil 182

Hubbegrenzung 182, 186  
 Hubhilfe 182f.  
 Hysterese 183, 185  
 Installationsgrundsätze 242ff.  
 Kennlinie 183ff.  
 Konstruktionsprinzipien 181  
 Lastanpassung 185  
 Leckraten 180f.  
 massebelastet 181  
 Niederhubventil 182  
 Normalventil 186  
 Proportionalventil 183  
 Querschnittsermittlung 193ff., 217ff.  
 Sonderbauarten 182  
 Strömungsquerschnitt, engster 188  
 Vollhubventil 182, 185  
 Zusatzbelastung 182  
 Sicherheitsvorrichtungen 10  
 Sicherheitszuschläge 142  
 Sicherungskonzept 10, 132  
 Stoffwertmodule 294ff.  
 Strömung  
     Flüssigkeit 190  
     Gase/Dämpfe 190  
     nicht-turbulent 49, 195  
     überkritisch 190, 197  
     unterkritisch 190, 197  
     Zweiphasen 247  
  
 Toleranzen 141  
     Ansprechdruck 181  
     Druckregelung 141  
     Temperaturregelung 141  
 Trenngefäß 243, 255f.  
  
 Umgebungsdruck 195, 197, 202  
  
 Varianten, Absicherung 16f., 25, 29  
 Ventilkoeffizient 58, 62, 72, 157f.  
 Ventilzufluß, Lastfall 47ff.  
 Verriegelungsschaltungen 132  
 Vollhubsicherheitsventil 182, 185  
 Volumenexpansion 90ff.

Vordruck 188f.  
 Vorlaufdruck 143, 145  
 Vorlauftemperatur 145  
  
 Wärmedurchgangskoeffizient 93, 108, 297  
     theoretische Ermittlung 299  
     Umrechnung, Herstellerangaben 298  
 Wärmekapazitätsstrom 93  
 Wärmenennleistung 297  
 Wärmestrom, Wärmeleistung 93, 108, 297  
 Wärmezufuhr, Lastfall 90ff.  
 Wasser-Fallrohr 254f., 258  
 Wasservorlage 261f.  
  
 Zuleitung 242  
     Bemessung 245ff.  
 Zusatzbelastung 182  
 Zustands-, Stoffwertmodule 294ff.  
 Zweiphasenströmung 247