

Walter Wagner

# Festigkeits- berechnungen im Apparate- und Rohrleitungsbau

5., überarbeitete Auflage

Vogel Buchverlag

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |         |  |    |
|--|----|---------|--|----|
| <b>Vorwort</b> . . . . .   | 5  | 3.2.5   | Berechnungsgrößen . . . . .  | 27 |
| <b>Bedeutung der wichtigsten Formelzeichen</b> . . . . .                                 | 9  | 3.2.5.1 | Berechnungsformel . . . . .  | 27 |
| <b>1 Einleitung</b> . . . . .  | 13 | 3.2.5.2 | Zuschlag $c_1$ zum Ausgleich<br>der zulässigen Wanddicken-<br>Unterschreitung . . . . .          | 29 |
| <b>2 Allgemeine Analyse des<br/>mechanischen Verhaltens</b> . . . . .                    | 14 | 3.2.5.3 | Zuschlag $c_2$ für Korrosion<br>bzw. Abnutzung . . . . .   | 29 |
| 2.1 Spannungsanalyse . . . . .   | 14 | 3.2.5.4 | Berechnungsdruck $p$ . . . . .   | 29 |
| 2.1.1 Primäre Spannungen . . . . .   | 14 | 3.2.5.5 | Berechnungstemperatur . . . . .  | 30 |
| 2.1.2 Sekundäre Spannungen . . . . .   | 14 | 3.2.5.6 | Zulässige Beanspruchung $\sigma_{zul}$ . . . . .   | 30 |
| 2.1.3 Spannungsspitzen . . . . .   | 14 | 3.2.5.7 | Festigkeitskennwert $K$ . . . . .  | 30 |
| 2.1.4 Vergleichsspannungen . . . . .   | 14 | 3.2.5.8 | Sicherheitsbeiwert $S$ . . . . .   | 30 |
| 2.2 Ermüdungs- und<br>Sprödbruchanalyse . . . . .  | 15 | 3.2.5.9 | Schweißnahtwertigkeit $v_N$ . . . . .  | 31 |
| 2.3 Spezielle Berechnungsmethoden . . . . .  | 15 | 3.2.6   | Prüfdruck für das einzelne Rohr . . . . .  | 31 |
| 2.3.1 Stufenkörpermethode (SKM) . . . . .  | 15 | 3.3     | Berechnung von Abzweigungen . . . . .  | 35 |
| 2.3.2 Methode der finiten Differenzen<br>(FDM) sowie finiten Elemente<br>(FEM) . . . . . | 15 | 3.3.1   | Allgemeines Flächenvergleichs-<br>verfahren . . . . .  | 35 |
| <b>3 Festigkeitsberechnung</b> . . . . .   | 17 | 3.3.2   | Bestimmung der tragenden Längen . . . . .  | 35 |
| 3.1 Flüssigkeitsdruck . . . . .  | 17 | 3.3.3   | Druckbeaufschlagte und tragende<br>Flächen . . . . .   | 37 |
| 3.1.1 Druck aus Gewichtskraft . . . . .  | 17 | 3.3.4   | Verschwächungsfaktor . . . . .   | 37 |
| 3.1.2 Druckkraft gegen gekrümmte<br>Wände . . . . .                                      | 18 | 3.3.5   | Rohrleitungen mit schrägem<br>Einzelabzweig . . . . .  | 40 |
| 3.2 Berechnung von Rohren (Zylindern) . . . . .  | 18 | 3.3.6   | Rohrleitungen mit mehreren<br>Ausschnitten oder Abzweigungen<br>in Längsrichtung . . . . .       | 41 |
| 3.2.1 Innendruckbeanspruchung . . . . .  | 18 | 3.3.7   | Rohrleitungen mit Ausschnitten<br>oder Abzweigen mit einem<br>Winkel zur Längsrichtung . . . . . | 42 |
| 3.2.1.1 Umfangsspannung . . . . .  | 19 | 3.3.8   | Rohrabzweigungen mit<br>Verstärkungen . . . . .  | 43 |
| 3.2.1.2 Längsspannung . . . . .  | 19 | 3.4     | Berechnung von Rohrbögen . . . . .   | 45 |
| 3.2.1.3 Radialspannung . . . . .   | 19 | 3.5     | Berechnung von Segmentbögen . . . . .  | 48 |
| 3.2.2 Vergleichsspannung . . . . .   | 19 | 3.6     | Berechnung von Rohrerweiterung . . . . .   | 49 |
| 3.2.2.1 Gestaltänderungshypothese . . . . .  | 20 | 3.7     | Berechnung von Rohrabschlüssen . . . . .   | 49 |
| 3.2.2.2 Schubspannungshypothese . . . . .  | 20 | 3.7.1   | Gewölbte Böden . . . . .   | 49 |
| 3.2.2.3 Normalspannungshypothese . . . . .   | 20 | 3.7.2   | Ebene Scheibe . . . . .  | 53 |
| 3.2.3 Mittlere Vergleichsspannung<br>im Rohr (Zylinder) . . . . .                        | 20 | 3.8     | Berechnung von kegelförmigen<br>Reduzierstücken . . . . .  | 55 |
| 3.2.3.1 Mittlere Umfangsspannung . . . . .   | 20 | 3.8.1   | Rohrkegel mit einem Kegelwinkel<br>kleiner $70^\circ$ . . . . .                                  | 55 |
| 3.2.3.2 Mittlere Längsspannung . . . . .   | 20 | 3.8.2   | Rohrkegel mit einem Kegelwinkel<br>größer $70^\circ$ . . . . .                                   | 56 |
| 3.2.3.3 Mittlere Vergleichsspannung . . . . .  | 21 | 3.8.3   | Kegelkrempe . . . . .  | 56 |
| 3.2.4 Rechnerische Rohrwanddicke . . . . .   | 23 | 3.9     | Bauteile unter äußerem Überdruck . . . . .   | 60 |
| 3.2.4.1 Abgrenzung des Geltungs-<br>bereiches . . . . .                                  | 23 | 3.9.1   | Einbeulen von Rohrteilen . . . . .   | 61 |
| 3.2.4.1.1 Spannungsvergleich . . . . .   | 23 | 3.9.1.1 | Rohre (Zylinder) . . . . .   | 61 |
| 3.2.4.1.2 Berücksichtigung der Verform-<br>barkeit der Werkstoffe . . . . .              | 24 |         |  |    |
| 3.2.4.1.3 Geltungsbereiche in den<br>Regelwerken . . . . .                               | 26 |         |  |    |

|          |  |     |          |  |            |
|----------|--|-----|----------|--|------------|
| 3.9.1.2  | Böden . . . . .  | 61  | 3.18     | Berechnung von Kunststoff-<br>bauteilen . . . . .  | 118        |
| 3.9.1.3  | Sicherheitsfaktor . . . . .  | 61  | 3.18.1   | Kunststoffrohrleitungen . . . . .  | 118        |
| 3.10     | Veränderliche Innendruck-<br>beanspruchung . . . . .   | 62  | 3.18.2   | Kunststoff-Rechteckbehälter . . . . .  | 119        |
| 3.10.1   | Grenzlastspielzahlen . . . . .   | 64  | <b>4</b> | <b>Spezielle Hinweise für den<br/>Apparate- und Druckbehälterbau . . . . .</b>                   | <b>123</b> |
| 3.10.1.1 | Abgrenzung . . . . .   | 64  | 4.1      | Anwendungsgleichungen und<br>-diagramme . . . . .  | 123        |
| 3.10.2   | Schwellende Innendruck-<br>beanspruchung bei Rohren . . . . .  | 66  | 4.2      | Ausrüstung und Prüfung . . . . .   | 146        |
| 3.10.3   | Schwellende Innendruck-<br>beanspruchung bei Abzweigen . . . . .   | 66  | 4.2.1    | Berstsicherungen . . . . .   | 146        |
| 3.10.4   | Schwellfestigkeit bei gebogenen<br>Rohren . . . . .  | 68  | 4.2.1.1  | Allgemeines . . . . .  | 146        |
| 3.10.5   | Schwellfestigkeit bei höheren<br>Temperaturen . . . . .  | 68  | 4.2.1.2  | Konstruktiver Aufbau . . . . .   | 146        |
| 3.10.6   | Zulässige Beanspruchung bei<br>Zeitschwingbruch . . . . .  | 69  | 4.2.1.3  | Bemessung von Berstsicherung<br>und Zuleitung . . . . .  | 146        |
| 3.10.7   | Zulässige Beanspruchung bei<br>Dauerbruch . . . . .  | 69  | 4.2.1.4  | Bemessung bei schnellem<br>Druckanstieg . . . . .  | 149        |
| 3.11     | Druckstoß . . . . .  | 69  | 4.2.2    | Sicherheitsventile . . . . .   | 149        |
| 3.12     | Primäre Zusatzbeanspruchungen . . . . .  | 73  | 4.2.2.1  | Allgemeines . . . . .  | 149        |
| 3.13     | Sekundäre Zusatzspannungen . . . . .   | 73  | 4.2.2.2  | Größenbemessung . . . . .  | 150        |
| 3.13.1   | Beurteilung der sekundären<br>Zusatzspannungen . . . . .   | 73  | 4.2.2.3  | Querschnitte, Leitungen, Einbau . . . . .  | 152        |
| 3.14     | Wärmespannungen . . . . .  | 74  | 4.2.2.4  | Auswahlkriterien für Sicherheits-<br>ventile . . . . .   | 153        |
| 3.14.1   | Stationäre Wärmespannungen . . . . .   | 74  | 4.2.3    | Öffnungen und Verschlüsse . . . . .  | 158        |
| 3.14.2   | Instationäre Wärmespannungen . . . . .   | 75  | 4.2.4    | Prüfung . . . . .  | 159        |
| 3.14.2.1 | Thermoschockspannung . . . . .   | 75  | 4.2.4.1  | Prüfung vor Inbetriebnahme . . . . .   | 159        |
| 3.14.2.2 | Quasistationäre Wärmespannung . . . . .  | 76  | 4.2.4.2  | Wiederkehrende Prüfungen . . . . .   | 160        |
| 3.15     | Flanschverbindungen . . . . .  | 78  | <b>5</b> | <b>Werkstoffe . . . . .</b>  | <b>163</b> |
| 3.15.1   | Äußere Kräfte . . . . .  | 78  | 5.1      | Rohre bzw. Zylinder und Bleche . . . . .   | 163        |
| 3.15.2   | Schraubenkraft . . . . .   | 82  | 5.1.1    | Unlegierte Stähle . . . . .  | 163        |
| 3.15.3   | Äußere Momente . . . . .   | 83  | 5.1.2    | Wärmefeste und hochwärmefeste<br>Stähle . . . . .  | 164        |
| 3.15.4   | Flanschwiderstand . . . . .  | 83  | 5.1.3    | Nichtrostende und säurebeständige<br>Stähle . . . . .  | 164        |
| 3.15.5   | Kraft-Verformungs-Verhältnisse . . . . .   | 85  | 5.1.4    | Hitzebeständige Stähle . . . . .   | 165        |
| 3.15.5.1 | Verspannungsschaubild bei den<br>verschiedenen Betriebszuständen . . . . .   | 90  | 5.1.5    | Kaltzähe Stähle . . . . .  | 166        |
| 3.15.6   | Spezielle Betrachtungen zum<br>Anwendungsbereich von It-<br>Dichtungen in Rohrleitungs-<br>Flanschverbindungen . . . . . | 96  | 5.1.6    | Druckwasserstoffbeständige Stähle . . . . .  | 166        |
| 3.15.6.1 | Anwendungsbereich der<br>It-Dichtungen . . . . .   | 96  | 5.2      | Flansche . . . . .   | 167        |
| 3.15.6.2 | Dichtungskräfte . . . . .  | 97  | 5.3      | Schrauben und Muttern . . . . .  | 167        |
| 3.16     | Festigkeitsberechnungen von<br>Gehäusen . . . . .  | 111 | 5.4      | Thermoplastische Kunststoffe . . . . .   | 167        |
| 3.16.1   | Kugelige Grundkörper<br>ohne Ausschnitte . . . . .   | 111 | 5.4.1    | Werkstoffeigenschaften von PE-HD<br>(Polyethylen hoher Dichte) . . . . .                         | 167        |
| 3.16.2   | Grundkörper mit Oval-<br>bzw. Vierkantquerschnitten<br>ohne Abzweig . . . . .  | 112 | 5.4.2    | Werkstoffeigenschaften von PP<br>(Polypropylen) . . . . .  | 167        |
| 3.16.3   | Grundkörper mit ebenen<br>Abflachungen . . . . .   | 115 | 5.4.3    | Werkstoffeigenschaften von PVDF<br>(Polyvinylidenfluorid) . . . . .                              | 168        |
| 3.16.4   | Tellerböden . . . . .  | 115 | 5.4.4    | Die chemische Widerstands-<br>fähigkeit von thermoplastischen<br>Kunststoffen . . . . .          | 168        |
| 3.16.5   | Gehäusekörper mit Abzweig . . . . .  | 116 | 5.5      | Zusammenstellung der wichtigsten<br>Bestimmungsgleichungen für<br>Rohrleitungselemente . . . . . | 193        |
| 3.17     | Balgekompensatoren . . . . .   | 117 |          | <b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>  | <b>197</b> |
|          |  |     |          | <b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>  | <b>199</b> |