

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                   |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Vorwort</b> .....                                                              | <b>XIII</b> |
| <b>Symbolverzeichnis</b> .....                                                    | <b>XV</b>   |
| <b>1 Einleitung</b> .....                                                         | <b>1</b>    |
| <b>2 Strömungstechnische Grundlagen</b> .....                                     | <b>6</b>    |
| 2.1 Eigenschaften der Luft .....                                                  | 6           |
| 2.1.1 Luft als strömendes Medium .....                                            | 6           |
| 2.1.2 Dichte der Luft .....                                                       | 6           |
| 2.2 Kinematische Grundbegriffe .....                                              | 7           |
| 2.2.1 Geschwindigkeit; instationäre und stationäre Strömung .....                 | 7           |
| 2.2.2 Stromlinien, Bahnlinien, Streichlinien .....                                | 7           |
| 2.2.3 Stromröhre .....                                                            | 8           |
| 2.2.4 Bedingungen am Körper .....                                                 | 9           |
| 2.2.5 Drehung .....                                                               | 9           |
| <b>3 Grundgleichungen der Strömung</b> .....                                      | <b>11</b>   |
| 3.1 Kontinuitätsgleichung .....                                                   | 11          |
| 3.2 Bewegungsgleichung in Stromlinienrichtung .....                               | 12          |
| 3.3 Bernoullische Gleichung .....                                                 | 13          |
| 3.4 Bewegungsgleichung normal zur Stromlinie .....                                | 16          |
| 3.5 Rechenbeispiel: Berechnung der Geschwindigkeit aus dem Staudruck ..           | 17          |
| <b>4 Bewegung zäher Flüssigkeiten; Turbulenz, Ähnlichkeit, Grenzschicht</b> ..... | <b>18</b>   |
| 4.1 Laminare und turbulente Strömung .....                                        | 18          |
| 4.2 Turbulenzstruktur .....                                                       | 19          |
| 4.2.1 Mittelwerte und Schwankungen .....                                          | 19          |
| 4.2.2 Streuungen der Schwankungen (Effektivwerte), Turbulenzgrad ..               | 19          |
| 4.2.3 Energiespektrum .....                                                       | 20          |
| 4.2.4 Korrelation der Schwankungen .....                                          | 21          |
| 4.2.5 Kohärenz der Schwankungen .....                                             | 22          |
| 4.3 Schubspannungen .....                                                         | 23          |
| 4.3.1 Laminare Schubspannung .....                                                | 23          |
| 4.3.2 Turbulente (scheinbare) Schubspannung .....                                 | 24          |
| 4.4 Mechanische Ähnlichkeit, Reynolds-Zahl .....                                  | 25          |

|         |                                                             |    |
|---------|-------------------------------------------------------------|----|
| 4.5     | Grenzschicht, Ablösung                                      | 27 |
| 4.5.1   | Laminare Grenzschicht                                       | 27 |
| 4.5.2   | Umschlag der Grenzschicht                                   | 29 |
| 4.5.3   | Turbulente Grenzschicht an der glatten ebenen Platte        | 29 |
| 4.5.4   | Turbulente Grenzschicht an der rauhen ebenen Platte         | 31 |
| 4.5.5   | Ablösung der Grenzschicht                                   | 32 |
| 4.5.6   | Der Nachlauf                                                | 34 |
| 4.5.6.1 | Mittlere Geschwindigkeiten und Turbulenz im Nachlauf        | 34 |
| 4.5.6.2 | Wirbelbildungen                                             | 35 |
| 4.6     | Strömung durch Öffnungen und Gänge                          | 39 |
| 4.6.1   | Bernoullische Gleichung mit Verlusten                       | 39 |
| 4.6.2   | Verlustquellen                                              | 40 |
| 4.6.2.1 | Druckverluste durch Reibung bei konstantem Querschnitt      | 40 |
| 4.6.2.2 | Plötzliche Erweiterung                                      | 40 |
| 4.6.2.3 | Plötzliche Verengung                                        | 42 |
| 4.6.2.4 | Umlenkungen                                                 | 44 |
| 4.6.2.5 | Einfluß der Geschwindigkeitsverteilung                      | 44 |
| 4.6.3   | Rechenbeispiele                                             | 44 |
| 4.6.3.1 | Berechnung des Innendrucks                                  | 44 |
| 4.6.3.2 | Strömung in einem Durchgang                                 | 45 |
| 5       | Kraftwirkungen auf Körper                                   | 48 |
| 5.1     | Drücke und Wandschubspannungen                              | 48 |
| 5.1.1   | Vergleich von Drücken und Wandschubspannungen               | 48 |
| 5.1.2   | Einfluß der Reynolds-Zahl auf die Druckverteilung           | 49 |
| 5.1.3   | Einfluß der Turbulenz auf die Druckverteilung               | 51 |
| 5.1.4   | Einfluß des Geschwindigkeitsprofils auf die Druckverteilung | 53 |
| 5.2     | Auftrieb, Widerstand, Querkraft                             | 57 |
| 5.2.1   | Auftriebs-, Widerstands- und Querkraftbeiwerte              | 57 |
| 5.2.2   | Die ebene Platte als Beispiel                               | 58 |
| 5.2.3   | Einfluß von Reynolds-Zahl und Oberflächenrauigkeit          | 61 |
| 5.2.4   | Einfluß der Turbulenz des Luftstromes                       | 64 |
| 5.2.5   | Einfluß des Geschwindigkeitsprofils und der Umgebung        | 66 |
| 5.2.6   | Interferenzeinfluß von Bauten                               | 67 |
| 5.2.6.1 | Verdrängungseffekte                                         | 67 |
| 5.2.6.2 | Windschatteneffekte                                         | 68 |
| 5.2.7   | Einfluß des Seitenverhältnisses und der Lage im Raum        | 71 |
| 6       | Der Wind                                                    | 77 |
| 6.1     | Ursachen des Windes                                         | 77 |
| 6.2     | Schichten der Atmosphäre                                    | 77 |
| 6.3     | Mittlere Geschwindigkeiten, Geschwindigkeitsprofile         | 80 |

|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4      | Turbulenzstruktur des Windes                                             | 88         |
| 6.4.1    | Turbulenzintensität                                                      | 88         |
| 6.4.2    | Korrelationen                                                            | 89         |
| 6.4.3    | Kohärenzen                                                               | 92         |
| 6.4.3.1  | Kohärenzen von Geschwindigkeitskomponenten                               | 92         |
| 6.4.3.2  | Druckkohärenzen                                                          | 94         |
| 6.4.4    | Das Spektrum des Windes                                                  | 97         |
| 6.5      | Statistische Verteilungen der mittleren Windgeschwindigkeiten            | 100        |
| 6.6      | Statistische Verteilung der Extremwerte                                  | 103        |
| 6.7      | Maßgebliche Geschwindigkeits- bzw. Staudruckverteilungen nach den Normen | 107        |
| 6.7.1    | DIN 1055, Teil 4                                                         | 107        |
| 6.7.2    | ÖNORM B4014, Teil 1                                                      | 108        |
| 6.7.3    | SIA 160                                                                  | 109        |
| 6.8      | Beispiele zur Ermittlung der maßgeblichen Windgeschwindigkeiten          | 110        |
| 6.8.1    | Normalhaus am Ortsrand                                                   | 110        |
| 6.8.2    | Normalhaus in Ortsmitte                                                  | 111        |
| 6.8.3    | Hochhaus in Kleinstadt                                                   | 113        |
| <b>7</b> | <b>Versuchstechnik, Modellgesetze</b>                                    | <b>117</b> |
| 7.1      | Versuchsarten                                                            | 117        |
| 7.2      | Modellgesetze                                                            | 117        |
| 7.2.1    | Elastizitätsparameter $E/\rho\bar{u}^2$                                  | 119        |
| 7.2.2    | Dichteverhältnis $\rho_k/\rho$                                           | 119        |
| 7.2.3    | Logarithmisches Dämpfungsdekrement $\delta_k$                            | 119        |
| 7.2.4    | Froude-Zahl $\bar{u}^2/g \cdot b$                                        | 119        |
| 7.2.5    | Reynolds-Zahl $\rho \cdot \bar{u} \cdot b/\mu$                           | 120        |
| 7.2.6    | Geschwindigkeitsprofil $\bar{u}(z)/\bar{u}(10)$                          | 120        |
| 7.2.7    | Turbulenzstruktur: $u_e/\bar{u}$ ; $L_u/b$ ; Spektren                    | 120        |
| 7.3      | Windkanäle                                                               | 121        |
| 7.4      | Versuchstechnik im Windkanal                                             | 123        |
| 7.4.1    | Das Modell                                                               | 123        |
| 7.4.2    | Strömungsverlauf                                                         | 124        |
| 7.4.3    | Geschwindigkeitsmessungen                                                | 125        |
| 7.4.4    | Druckmessungen                                                           | 126        |
| 7.4.5    | Kraft- und Momentmessungen                                               | 127        |
| 7.4.6    | Schwingungsuntersuchungen                                                | 127        |
| 7.5      | Meßtechnik im natürlichen Wind                                           | 129        |
| 7.5.1    | Meßobjekte                                                               | 129        |
| 7.5.2    | Geschwindigkeitsmessung                                                  | 129        |
| 7.5.3    | Druckmessungen                                                           | 130        |
| 7.5.4    | Kraft- und Momentenmessung                                               | 132        |
| 7.5.5    | Schwingungsuntersuchungen                                                | 132        |

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8 Windgeschwindigkeiten in der Umgebung von Bauwerken</b>         | <b>136</b> |
| 8.1 Gefährliche und zumutbare Windgeschwindigkeiten                  | 136        |
| 8.2 Kriterien und Beispiele                                          | 137        |
| 8.3 Berechnung der Windgeschwindigkeiten in Bodennähe                | 145        |
| 8.3.1 Erläuterungen des Rechenganges                                 | 145        |
| 8.3.2 Rechenbeispiele                                                | 148        |
| 8.3.2.1 Beispiel mit detaillierten Meßdaten aus Windkanal-           |            |
| messungen                                                            | 148        |
| 8.3.2.2 Beispiel einer Abschätzung mit Hilfe von Angaben aus         |            |
| Abschnitt 8.2                                                        | 150        |
| 8.4 Richtlinien zur Vermeidung hoher Windgeschwindigkeiten in Boden- |            |
| nähe                                                                 | 153        |
| <b>9 Statische Windlasten</b>                                        | <b>156</b> |
| 9.1 Statische und dynamische Windlasten                              | 156        |
| 9.2 Windlastrichtungen und Windrichtungen nach den Normen            | 159        |
| 9.3 Berechnung der statischen Windlasten                             | 160        |
| 9.3.1 Druck-, Reibungs- und Gesamtlasten                             | 160        |
| 9.3.2 Zuverlässigkeit bei der Rechnung mit Beiwerten                 | 163        |
| <b>10 Beiwerte für prismatische Baukörper</b>                        | <b>165</b> |
| 10.1 Gesamtlastbeiwerte                                              | 165        |
| 10.1.1 Gesamtlastbeiwerte nach Experimenten                          | 165        |
| 10.1.2 Gesamtlastbeiwerte nach DIN 1055, Teil 4                      | 166        |
| 10.1.3 Gesamtlastbeiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1                   | 167        |
| 10.1.4 Gesamtlastbeiwerte nach SIA 160                               | 168        |
| 10.1.5 Ergebnisse aus Messungen im Vergleich mit Werten der          |            |
| Normen                                                               | 169        |
| 10.2 Außendruckbeiwerte $c_{pa}$ vertikaler Flächen                  | 169        |
| 10.2.1 Außendruckbeiwerte nach Experimenten                          | 169        |
| 10.2.2 Mittlere Außendruckbeiwerte nach DIN 1055, Teil 4             | 174        |
| 10.2.3 Mittlere Außendruckbeiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1          | 174        |
| 10.2.4 Außendruckbeiwerte nach SIA 160                               | 175        |
| 10.3 Innendruckbeiwerte                                              | 177        |
| 10.3.1 Innendruckbeiwerte nach Experimenten                          | 177        |
| 10.3.2 Innendruckbeiwerte nach DIN 1055, Teil 4                      | 178        |
| 10.3.3 Innendruckbeiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1                   | 178        |
| 10.3.4 Innendruckbeiwerte nach SIA 160                               | 179        |
| 10.4 Örtliche Druckbeiwerte für vertikale Flächen                    | 181        |
| 10.4.1 Berechnung der örtlichen Maximallasten                        | 181        |
| 10.4.2 Örtliche Druckbeiwerte nach Experimenten; Schadensfälle       | 182        |
| 10.4.3 Örtliche Druckbeiwerte nach DIN 1055, Teil 4                  | 187        |
| 10.4.4 Örtliche Druckbeiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1               | 188        |
| 10.4.5 Örtliche Druckbeiwerte nach SIA 160                           | 189        |

|           |                                                          |            |
|-----------|----------------------------------------------------------|------------|
| 10.5      | Rechenbeispiele                                          | 189        |
| 10.5.1    | Turmhochhaus                                             | 189        |
| 10.5.1.1  | Berechnung nach DIN 1055, Teil 4                         | 189        |
| 10.5.1.2  | Berechnung nach ÖNORM B4014, Teil 1                      | 191        |
| 10.5.1.3  | Berechnung nach SIA 160                                  | 196        |
| 10.5.1.4  | Vergleich der Norm-Werte mit experimentellen Ergebnissen | 196        |
| 10.5.2    | Gebäude mit offener Giebelwand                           | 197        |
| 10.5.2.1  | Berechnung nach DIN 1055, Teil 4                         | 197        |
| 10.5.2.2  | Berechnung nach ÖNORM B4014, Teil 1                      | 201        |
| 10.5.2.3  | Berechnung nach SIA 160                                  | 202        |
| <b>11</b> | <b>Beiwerte für Dächer</b>                               | <b>207</b> |
| 11.1      | Sattel-, Pult- und Flachdächer                           | 207        |
| 11.1.1    | Außendruckbeiwerte nach Experimenten                     | 207        |
| 11.1.2    | Außendruckbeiwerte nach DIN 1055, Teil 4                 | 214        |
| 11.1.3    | Außendruckbeiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1              | 217        |
| 11.1.4    | Außendruckbeiwerte nach SIA 160                          | 220        |
| 11.2      | Freistehende Dächer                                      | 222        |
| 11.2.1    | Beiwerte nach Experimenten                               | 222        |
| 11.2.2    | Beiwerte nach DIN 1055, Teil 4                           | 224        |
| 11.2.3    | Beiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1                        | 224        |
| 11.2.4    | Beiwerte nach SIA 160                                    | 227        |
| 11.3      | Beispiele                                                | 227        |
| 11.3.1    | Geschlossenes Gebäude mit Satteldach                     | 227        |
| 11.3.1.1  | Berechnung nach DIN 1055, Teil 4                         | 229        |
| 11.3.1.2  | Berechnung nach ÖNORM B4014, Teil 1                      | 231        |
| 11.3.1.3  | Berechnung nach SIA 160                                  | 235        |
| 11.3.2    | Flugdach                                                 | 236        |
| 11.3.2.1  | Berechnung nach DIN 1055, Teil 4                         | 236        |
| 11.3.2.2  | Berechnung nach ÖNORM B4014, Teil 1                      | 237        |
| 11.3.2.3  | Berechnung nach SIA 160                                  | 239        |
| <b>12</b> | <b>Baukörper mit Kreisquerschnitt; Seile; Kugeln</b>     | <b>242</b> |
| 12.1      | Beiwerte nach Experimenten                               | 242        |
| 12.1.1    | Zylindrische Baukörper allgemein; Seile                  | 242        |
| 12.1.2    | Zylindrische Behälter                                    | 246        |
| 12.1.3    | Kühltürme                                                | 246        |
| 12.1.4    | Hangare                                                  | 250        |
| 12.1.5    | Kugeln                                                   | 250        |
| 12.2      | Beiwerte nach Normen                                     | 253        |
| 12.2.1    | Beiwerte nach DIN 1055, Teil 4                           | 253        |
| 12.2.2    | Beiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1                        | 257        |
| 12.2.3    | Beiwerte nach SIA 160                                    | 260        |

|           |                                                                                    |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.3      | Beispiel                                                                           | 264        |
| 12.3.1    | Berechnung nach DIN 1055, Teil 4                                                   | 264        |
| 12.3.2    | Berechnung nach ÖNORM B4014, Teil 1                                                | 265        |
| 12.3.3    | Berechnung nach SIA 160                                                            | 266        |
| <b>13</b> | <b>Profile, Fachwerke</b>                                                          | <b>269</b> |
| 13.1      | Beiwerte nach Experimenten                                                         | 269        |
| 13.1.1    | Das Einzelprofil                                                                   | 269        |
| 13.1.2    | Fachwerkswände                                                                     | 270        |
| 13.1.3    | Räumliche Fachwerke                                                                | 276        |
| 13.1.3.1  | Räumliche Fachwerke mit Rechteckquerschnitt                                        | 276        |
| 13.1.3.2  | Räumliche Fachwerke mit einem gleichseitigen Dreieck<br>als Querschnitt            | 277        |
| 13.2      | Beiwerte nach Normen                                                               | 279        |
| 13.2.1    | Beiwerte nach DIN 1055, Teil 4                                                     | 279        |
| 13.2.1.1  | Einzelprofile und räumliche Fachwerke allgemein                                    | 279        |
| 13.2.1.2  | Spezielle räumliche Fachwerke (Querschnitt Quadrat<br>oder gleichseitiges Dreieck) | 287        |
| 13.2.2    | Beiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1                                                  | 287        |
| 13.2.2.1  | Einzelprofile und räumliche Fachwerke allgemein                                    | 287        |
| 13.2.2.2  | Spezielle räumliche Fachwerke (Querschnitt Quadrat<br>oder gleichseitiges Dreieck) | 290        |
| 13.2.2.3  | Fachwerktürme mit gemischten Profilen                                              | 291        |
| 13.2.3    | Berechnung nach SIA 160                                                            | 291        |
| 13.3      | Beispiel: Vierkantmast                                                             | 293        |
| 13.3.1    | Berechnung nach DIN 1055, Teil 4                                                   | 295        |
| 13.3.2    | Berechnung nach ÖNORM B4014, Teil 1                                                | 295        |
| 13.3.3    | Berechnung nach SIA 160                                                            | 295        |
| 13.3.4    | Berechnung nach Ergebnissen von Experimenten                                       | 296        |
| <b>14</b> | <b>Verschiedene Bauten</b>                                                         | <b>298</b> |
| 14.1      | Tafeln und Fahnen                                                                  | 298        |
| 14.1.1    | Experimentelle Ergebnisse                                                          | 298        |
| 14.1.2    | Beiwerte nach Normen                                                               | 299        |
| 14.1.2.1  | Beiwerte nach DIN 1055, Teil 4                                                     | 299        |
| 14.1.2.2  | Beiwerte nach ÖNORM B4014, Teil 1                                                  | 299        |
| 14.1.2.3  | Beiwerte nach SIA 160                                                              | 299        |
| 14.2      | Gitter, Siebe                                                                      | 300        |
| 14.3      | Brücken                                                                            | 301        |
| 14.3.1    | Experimentelle Ergebnisse                                                          | 301        |
| 14.3.2    | Beiwerte nach Normen                                                               | 302        |
| 14.3.2.1  | Beiwerte nach DIN 1072                                                             | 302        |
| 14.3.2.2  | Beiwerte nach ÖNORM B4002 und B4003                                                | 303        |
| 14.3.2.3  | Beiwerte nach SIA 160                                                              | 303        |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>15 Schwingungstechnische Grundlagen</b>                                | <b>305</b> |
| 15.1 Allgemeine Bedeutung der Schwingungen von Konstruktionen             | 305        |
| 15.2 Instationäre aerodynamische Kräfte                                   | 306        |
| 15.3 Die lineare Schwingungsgleichung                                     | 308        |
| 15.3.1 System mit einem Freiheitsgrad                                     | 308        |
| 15.3.1.1 Die homogene Schwingungsgleichung                                | 309        |
| 15.3.1.2 Die inhomogene Schwingungsgleichung                              | 309        |
| 15.3.1.3 Dimensionslose Größen                                            | 310        |
| 15.3.2 System mit mehreren Freiheitsgraden                                | 311        |
| 15.3.2.1 Die Schwingungsgleichung                                         | 311        |
| 15.3.2.2 Eigenfrequenzen, Eigenformen, logarithmische<br>Dekremente       | 313        |
| 15.4 Zufallerregte Schwingungen                                           | 315        |
| <b>16 Wirbelerregte Schwingungen</b>                                      | <b>322</b> |
| 16.1 Strouhal-Zahl; kritischer Geschwindigkeitsbereich                    | 322        |
| 16.2 Experimentelle Ergebnisse                                            | 325        |
| 16.3 Mathematische Beschreibung                                           | 329        |
| 16.3.1 Erregerkraft                                                       | 329        |
| 16.3.2 Erregerkraft und aerodynamische Dämpfung                           | 331        |
| 16.3.3 Lustkraftoszillator                                                | 332        |
| 16.4 Maßnahmen zur Vermeidung der Schwingungen                            | 333        |
| 16.4.1 Mechanische Maßnahmen                                              | 333        |
| 16.4.2 Aerodynamische Maßnahmen                                           | 336        |
| 16.4.2.1 Scruton-Wendel und andere Störelemente                           | 337        |
| 16.4.2.2 Gittermantel, Perforation                                        | 339        |
| 16.4.2.3 Maßnahmen bei Brücken                                            | 341        |
| 16.5 Querschnittsdeformationsschwingungen (Ovalling)                      | 341        |
| 16.6 Rechenbeispiel                                                       | 345        |
| <b>17 Biegeschwingungen durch aerodynamische Instabilität (galloping)</b> | <b>353</b> |
| 17.1 Der Erregungsmechanismus                                             | 353        |
| 17.2 Die Schwingungsgleichung                                             | 355        |
| 17.3 Experimentelle und rechnerische Ergebnisse                           | 359        |
| 17.4 Maßnahmen zur Beseitigung                                            | 362        |
| 17.5 Rechenbeispiel                                                       | 364        |
| <b>18 Flattern</b>                                                        | <b>368</b> |
| 18.1 Der Begriff Flattern                                                 | 368        |
| 18.2 Luftkräfte und Luftkraftmomente                                      | 368        |
| 18.3 Das System der Schwingungsgleichungen                                | 369        |
| 18.4 Stabilitätskriterien                                                 | 371        |
| 18.5 Weitere Verfahren                                                    | 374        |

|           |                                                          |            |
|-----------|----------------------------------------------------------|------------|
| 18.6      | Ergebnisse von Experimenten und Maßnahmen gegen Flattern | 380        |
| 18.7      | Rechenbeispiel                                           | 381        |
| <b>19</b> | <b>Böenerregte Schwingungen</b>                          | <b>384</b> |
| 19.1      | Der Erregungsmechanismus                                 | 384        |
| 19.2      | Das Verfahren nach Davenport                             | 384        |
| 19.2.1    | Der Effektivwert der Schwankung der Auslenkung           | 384        |
| 19.2.2    | Die mittlere maximale Beanspruchung                      | 389        |
| 19.2.3    | Die mittlere maximale Beschleunigung                     | 390        |
| 19.3      | Weitere Verfahren; Schwingungstilgung                    | 391        |
| 19.4      | Rechenbeispiel                                           | 393        |
| <b>20</b> | <b>Schwingungen durch Interferenzeinfluß</b>             | <b>399</b> |
| 20.1      | Ursachen und Schadensfälle                               | 399        |
| 20.2      | Kreiszyindrische Baukörper in Reihe                      | 400        |
| 20.3      | Baukörper mit quadratischem Querschnitt in Reihe         | 403        |
|           | <b>Sachwortverzeichnis</b>                               | <b>406</b> |