

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Geschichte des Kältemittels CO<sub>2</sub></b> .....   | <b>11</b> |
| <b>2</b> | <b>Einflüsse von CO<sub>2</sub> auf Gesundheit, Anlagensicherheit und Umwelt</b> .....                            | <b>13</b> |
| <b>3</b> | <b>Kältetechnische Eigenschaften und deren Bedeutung für die Auslegung und den Betrieb von R744-Anlagen</b> ..... | <b>17</b> |
| 3.1      | Einführung und Definitionen. ....   | 17        |
| 3.2      | Bedeutung der relativ niedrigen kritischen Temperatur. ....   | 19        |
| 3.2.1    | Transkritischer Prozess .....   | 19        |
| 3.2.2    | Geringere effektive Leistungszahl .....   | 20        |
| 3.2.3    | Andere Bedingungen. ....  | 21        |
| 3.3      | Bedeutung von hohem Druck im Tripelpunkt. ....  | 22        |
| 3.4      | Bedeutung des generell hohen Druckniveaus .....   | 23        |
| 3.4.1    | Typische Drucklagen im Betrieb und im Stillstand. ....  | 23        |
| 3.4.2    | Druckauslegung .....  | 25        |
| 3.4.3    | Hubvolumen und Wirkungsgrad des Verdichters .....   | 27        |
| 3.4.4    | Druck- und Temperaturverluste im Gas- und Zweiphasengebiet. ....  | 28        |
| 3.5      | Bedeutung guter Wärmeübertragungseigenschaften .....  | 29        |
| 3.6      | Bedeutung des hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit. ....   | 30        |
| <b>4</b> | <b>Transkritischer Kälte-/Wärmepumpenprozess</b> .....  | <b>33</b> |
| 4.1      | Der Prozess im Druck-Enthalpie-Diagramm. ....   | 33        |
| 4.2      | Temperaturverlauf im Gaskühler. ....  | 35        |
| 4.2.1    | Temperaturverläufe im Temperatur-Enthalpie-Diagramm (T <sub>h</sub> -Diagramm) .....                              | 35        |
| 4.2.2    | Pinch-Punkt in Gaskühlern .....   | 36        |
| 4.2.3    | Temperaturannäherung. ....  | 37        |
| 4.2.4    | Temperaturanpassung für Heizbedarf mit mehreren Temperaturstufen .....  | 39        |
| 4.2.5    | Berechnungsmethoden .....   | 40        |
| 4.3      | Bedeutung des Gaskühlerdrucks für die Kälteleistung .....   | 40        |
| 4.4      | Die Bedeutung des Drucks im Gaskühler für die Leistungszahl. ....   | 42        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.5      | Optimale Hochdruckregelung von CO <sub>2</sub> -Prozessen .....            | 43        |
| 4.5.1    | Grundlagen zur Optimierung .....   | 43        |
| 4.5.2    | Regelungsstrategie .....   | 44        |
| <b>5</b> | <b>Technische Lösungen mit CO<sub>2</sub></b> .....                        | <b>47</b> |
| 5.1      | CO <sub>2</sub> als verdampfender Kälteträger .....                        | 47        |
| 5.2      | CO <sub>2</sub> im konventionellen Kälteprozess – Kaskadenanlage .....     | 49        |
| 5.3      | Der transkritische Prozess – grundlegende Lösungen .....                   | 53        |
| 5.3.1    | Anlage mit Niederdrucksammler und einfacher Entspannung .....              | 53        |
| 5.3.2    | Anlage mit Zwischendrucksammler, zweistufige Entspannung .....             | 55        |
| 5.3.3    | Anlagen mit Zwischendruck- und Niederdrucksammler .....                    | 58        |
| 5.3.4    | Transkritischer, zweistufiger Prozess .....                                | 58        |
| 5.3.5    | Lösungen mit Kältebedarf auf zwei Temperaturniveaus .....                  | 59        |
| <b>6</b> | <b>Methoden zur Prozessverbesserung</b> .....                              | <b>61</b> |
| 6.1      | Zwischenkühlung in zweistufigen Anlagen .....                              | 61        |
| 6.2      | Parallelverdichtung .....  | 61        |
| 6.3      | Abkühlung des überkritischen Gases<br>nach dem Gaskühler .....             | 62        |
| 6.4      | Rückgewinn von Expansionsarbeit .....                                      | 64        |
| <b>7</b> | <b>Wärmerückgewinnung mit CO<sub>2</sub>-Anlagen</b> .....                 | <b>69</b> |
| 7.1      | Einfache Lösung der Wärmerückgewinnung auf einem<br>Temperaturniveau ..... | 70        |
| 7.2      | Wärmerückgewinnung auf verschiedenen Temperaturniveaus .....               | 71        |
| <b>8</b> | <b>CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen</b> .....                                    | <b>77</b> |
| 8.1      | Allgemeines .....  | 77        |
| 8.2      | Produktion von warmem Nutzwasser .....                                     | 77        |
| 8.3      | Kombinierte Raumheizung und Warmwasseraufbereitung .....                   | 82        |
| <b>9</b> | <b>Sicherheit bei der Anwendung von CO<sub>2</sub></b> .....               | <b>83</b> |
| 9.1      | Druck und Temperatur – Sicherheitsbedingungen .....                        | 83        |
| 9.2      | Trockeneis – Sicherheits- und Betriebsbedingungen .....                    | 84        |

---

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>10</b> | <b>Anwendungsbeispiele für CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen</b> .....                           | 87  |
| 10.1      | Kaskadenkälteanlagen mit CO <sub>2</sub> als Kältemittel .....                             | 87  |
| 10.1.1    | Industrielle Anlagen .....   | 87  |
| 10.1.2    | Kunsteisbahnen .....   | 88  |
| 10.1.3    | Anlagen im Einzelhandel .....  | 89  |
| 10.1.4    | Fischerboote .....   | 90  |
| 10.2      | Transkritische Anlagen .....   | 92  |
| 10.2.1    | Kleine Anlagen für den Einzelhandel .....  | 92  |
| 10.2.2    | Leistungsstarke, zentrale Anlagen für den Einzelhandel und Industrie-<br>kälteanlagen..... | 93  |
| 10.2.3    | Warmwasser-Wärmepumpen.....  | 105 |
| 10.2.4    | Klimaanlagen .....   | 108 |
| 10.2.5    | Transport.....   | 109 |
| 10.2.6    | Mobile Klimaanlagen.....   | 109 |
| 10.2.7    | Meerwasserkühler für die Fischindustrie .....  | 110 |
| 10.2.8    | Fischerboote, Tiefkühlung .....  | 111 |
| 10.2.9    | Andere Anwendungsbereiche für CO <sub>2</sub> als Kältemittel .....                        | 112 |
| <b>11</b> | <b>Literatur</b> .....   | 113 |