

Vogel Fachbuch

Kamprath-Reihe

Walter Wagner

Wärmeträger- technik

mit organischen Fluiden

Walter Wagner

Wärmeträgertechnik mit organischen Fluiden

Kamprath-Reihe

Dipl.-Ing. Walter Wagner

Wärmeträgertechnik

mit organischen Fluiden

8., überarbeitete und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

Dipl.-Ing. **WALTER WAGNER**

Jahrgang 1941, absolvierte nach einer Lehre als Technischer Zeichner ein Maschinenbaustudium und war 1964 bis 1968 Anlagenplaner im Atomreaktorbau; nach einer Ausbildung zum Schweiß-Fachingenieur war er ab 1968 Technischer Leiter im Apparatebau, Kesselbau und in der Wärmetechnik. 1974 bis 1997 bekam Walter Wagner einen Lehrauftrag an der Fachhochschule Heilbronn, von 1982 bis 1984 zusätzlich an der Fachhochschule Mannheim und von 1987 bis 1989 an der Berufsakademie Mosbach. Im Zeitraum 1988 bis 1995 war er Geschäftsführer der Hoch-Temperatur-Technik Vertriebsbüro Süd GmbH. Seit 1992 ist er Leiter der Beratung und Seminare für Anlagentechnik: WTS Wagner-Technik-Service. Walter Wagner ist außerdem Obmann verschiedener DIN-Normen und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Wärmeträgertechnik, Thermischer Apparatebau und Rohrleitungstechnik.

Haftungsausschluss

Autor und Verlag haben alle Texte, Bilder und Tabellen in diesem Buch mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Eine Haftung des Verlags oder des Autors, gleich aus welchem Rechtsgrund, ist ausgeschlossen. Die in diesem Buch wiedergegebenen Bezeichnungen können Warenzeichen sein, deren Benutzung durch Dritte für deren Zwecke die Rechte der Inhaber verletzen kann.

Weitere Informationen: www.vogel-buchverlag.de

ISBN Print: 978-3-8343-3204-2

ISBN E-Book: 978-3-8343-6038-0

8. Auflage. 2011

Die Auflagen 1 bis 6 erschienen im Dr. Ingo Resch Verlag, 82166 Gräfelfing.

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2005 by Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Wärmeträgerfluide im weiteren Sinne sind neben Wasser und Wasserdampf: Kältemittel, organische Fluide, Salzschnmelzen, flüssige Metalle und Heißgase. In diesem betriebstechnischen Fachbuch werden Anlagen beschrieben, die primär organische Wärmeträgerfluide verwenden. Es ist bisher das einzige Standardwerk, das diese Technik umfassend beschreibt.

Als im Sommer 1973 die 1. Auflage der «Wärmeträgertechnik» erschien, waren die ersten Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Fluiden erfolgreich in der Industrie eingesetzt. Seitdem hat sich die Technik konsequent und stetig weiterentwickelt, neue Vorschriften und Regelungen wurden erarbeitet, neue Anwendungsgebiete erschlossen. Besonders die Möglichkeit – fast drucklos –, Temperaturen bis 400 °C zu übertragen und feinstellig zu regeln, ist gerade einer der Vorteile der Wärmeträgertechnik mit organischen Fluiden.

Bedingt durch das europäische Regelwerk war es notwendig, neben den stets gültigen Grundlagen, die Auflage den neuen Rahmenbedingungen anzupassen. So wurde Kapitel 11 mit seinen Ausführungen über Verordnungen, Vorschriften, Richtlinien, Normen und Gesetzen auf den neuesten Stand gebracht. Das gleiche gilt für Kapitel 12, denn Neuerungen und technische Weiterentwicklungen sind für die betriebliche Praxis besonders wichtig. So sind jetzt auch Einzelelemente von Anlagen Bestandteil dieses Kapitels. Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen wurden in Kapitel 13 neu aufgenommen. Für Kapitel 14 und 15 konnten neben den Projektierungsgleichungen wichtige Diagramme, Tabellen und Bilder für die Projektierung herangezogen werden. In Kapitel 16 wurden die Stoffdatentabellen der Fluide überarbeitet und zusätzlich mit Diagrammen und Gleichungen ergänzt.

Für die Projektierung von Anlagen, deren Genauigkeit immer höheren Anforderungen gerecht werden muß, für Planungs- und Berechnungshilfen und bei Fragen und Problemen aus der täglichen Praxis der Verfahrenstechnik kann das Buch auch als Nachschlagewerk wertvolle Hilfen bieten.

Mit der Übergabe der «Wärmeträgertechnik» an den Vogel Buchverlag sind nun alle meine Bücher in einem Verlag zusammengefaßt. Die von mir veröffentlichten Fachbücher, mit speziellen Themen zur Verfahrenstechnik (siehe Impressum), enthalten viele Beispiele, z.B. über Feuerraumberechnungen, Pumpen-, Regelventil-, Sicherheitsventil- und Wärmeaustauscher-Auslegungen usw., sowie die für die Wärmeträgertechnik wichtigen Druckverlustberechnungen. Resonanz zum Buch und den vermittelten Lösungswegen ist mir stets willkommen, weil ein lebendiger Wissensaustausch Forschungs- und Lehrbetrieb immer wieder motivieren und inspirieren kann. Den schnellsten Kontakt erfüllt eine E-Mail: wagner@wts-online.de.

Für zahlreiche Anregungen zur Überarbeitung sowie Beiträge (insbesondere zu den Kapiteln 11, Gesetze und Normen, sowie Kapitel 16, Stoffdaten von organischen Wärmeträgerfluiden) möchte ich Herrn Stefan Schmitt, HTT energy systems, danken. Dem Vogel Buchverlag danke ich für die gewohnt hervorragende Zusammenarbeit.

Dipl.-Ing. WALTER WAGNER
ist Autor folgender Vogel Fachbücher
der Kamprath-Reihe:

Festigkeitsberechnungen im
Apparate- und Rohrleitungsbau
Kreiselpumpen und
Kreiselpumpenanlagen
Lufttechnische Anlagen
Planung im Anlagenbau
Regel- und Sicherheitsarmaturen
Rohrleitungstechnik
Strömung und Druckverlust
Wärmeaustauscher
Wärmeträgertechnik
Wärmeübertragung
Wasser und Wasserdampf
im Anlagenbau

Zur Themenreihe gehören ebenfalls
aus dem Vogel Buchverlag:

DIETZEL / WAGNER: Technische Wärmelehre
HEMMING / WAGNER: Verfahrenstechnik
BOHL / ELMENDORF: Strömungsmaschinen 1
BOHL: Strömungsmaschinen 2
BOHL / ELMENDORF: Technische Strömungslehre

H. J. BULLACK: (CD-ROM)
Berechnung von Druckbehälter-Bauteilen
Berechnung von Sicherheitseinrichtungen
Berechnung metallischer Rohrleitungsbauteile 1
Pipe Elements / Rohrleitungsbauteile

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Bedeutung der wichtigsten Formelzeichen	15
1 Einleitung	19
2 Wärmeträgerfluide	23
2.1 Allgemeines	23
2.1.1 Wasser und Wasserdampf	26
2.1.2 Salzschnmelzen	27
2.1.3 Flüssige Metalle	29
2.2 Organische Wärmeträger	30
2.2.1 Allgemeines	30
2.2.2 Thermische Stabilitätsgrenze	44
2.2.3 Alterung	44
2.2.4 Löslichkeit von Gasen	45
2.2.5 Korrosionsverhalten	50
2.2.6 Herstellung von Wärmeträgern auf Mineralölbasis	52
2.2.7 Herstellung synthetischer Wärmeträger	53
2.2.8 Stoffwerte und Untersuchungsmethoden	54
2.2.9 Einsatzgrenzen	68
2.2.10 Bewertung	76
2.2.11 Physiologische Eigenschaften, Brennbarkeit und Beseitigung	80
2.2.12 Auswahlkriterien für organische Wärmeträger	81
2.2.13 Beachtungsmerkmale und noch offene Fragen bei organischen Wärmeträgerfluiden	90
2.2.14 Grundsätzliche Ergänzungen zur Thermostabilität und zu den Untersuchungsmethoden	100
2.2.15 Zulässige Filmtemperatur im Erhitzer	128
2.2.16 Stoffwerte von Wärmeträgerölen	146
2.3 Wärmeträger auf Silikonölbasis	149
2.3.1 Allgemeines	149
2.3.2 Wärmebeständigkeit	151
2.3.3 Dampfdruck	151
2.3.4 Wärmeübertragungseigenschaften	152
2.3.5 Betriebssicherheit und Umweltschutz	153
2.3.6 Tieftemperaturverhalten	155
2.3.7 Brandlast	155
2.3.8 Verträglichkeit	156
2.3.9 Zu berücksichtigende verfahrenstechnische Maßnahmen	156
2.3.10 Wärmeträger für den Tieftemperaturbetrieb	161
2.4 Glykolische Wärmeträger	161
2.4.1 Allgemeines	161
2.4.2 Der chemische Aufbau der Polyethylenglykole (PEG)	162
2.4.3 Glykol-Wasser-Gemisch als Wärmeträger	163
3 Aufbau von Wärmeübertragungsanlagen	175
3.1 Bildzeichen, Fließbilder und Kurzzeichen	175
3.2 Anlagensysteme	178

3.2.1	Wärmeübertragung durch freie Konvektion	180
3.2.2	Wärmeübertragung durch Naturkonvektion	180
3.2.3	Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion	182
3.3	Systemaufbau von Anlagen mit erzwungener Konvektion	183
3.3.1	Pumpe im Vorlauf	184
3.3.2	Pumpe im Rücklauf	185
3.3.3	Zweikreisanlage	185
3.4	Systemergänzungen	186
3.4.1	Überlaufleitung	186
3.4.2	Rauchgastemperaturbegrenzer	188
3.4.3	Leckagekontrolle	188
3.4.4	Zusatzausrüstungen	188
3.5	Anlagentrennsystem zur Atmosphäre	188
3.5.1	Temperaturverlauf im Ausdehnungsbehälter	189
3.5.2	Unmittelbare Verbindung zur Atmosphäre	191
3.5.3	Kaltmedium-Vorlage	194
3.5.4	Inertgas-Abdeckung	196
3.6	Wärmeträger im Sammelbehälter	200
3.6.1	Entlüftungsleitungen	201
3.7	Parallelschaltung von Erhitzern	202
3.7.1	Pumpen im Vorlauf	202
3.7.2	Pumpen im Rücklauf	203
3.7.3	Primärpumpe und Sekundärpumpe	204
3.8	Strömungstechnische Schaltungsmöglichkeiten der Wärmeverbraucher	205
3.8.1	Überströmregelung	205
3.8.2	Regelung mit Dreiwegeventil	206
3.8.3	Unterregelkreis	207
3.8.4	Heiz- und Kühlkreislauf	208
3.8.5	Primär- und Sekundärkreislauf mit Mischungsregelung des Verbrauchers	209
3.9	Ergänzungen und Zusammenfassung der Anlagensysteme	210
3.9.1	Einbauort des Dreiwegeventils	210
3.9.2	Thermosiphonströmung zum Wärmeverbraucher	212
3.10	Auswahlkriterien für das Anlagensystem	213
3.11	Anlagen mit flüssigem und dampfförmigem Wärmeträger	213
3.12	Anlagenkenndaten	219
3.13	Systemkennlinie der Anlage	223
3.14	Sicherheitstechnische Ausrüstung	225
3.15	Aufbau von Salzschnmelzen-Anlagen	233
3.16	Aufbau von Flüssigmetall-Anlagen	236
4	Wärme- und strömungstechnische Grundlagen	241
4.1	Wärmeträgervolumenstrom	241
4.2	Wärmeträgerseitige Druckverluste	245
4.3	Wärmetechnische Grundlagen	249
5	Erhitzer	255
5.1	Elektroerhitzer	255
5.1.1	Elektroerhitzer in Behälterbauweise	255

5.1.2	Elektroerhitzer mit Rohrsystem	256
5.1.3	Heizelemente	257
5.1.4	Heizkörpereinbau	260
5.1.5	Auslegungsrichtlinien und Bauarten	261
5.2	Direkt befeuerte Erhitzer	276
5.2.1	Verbrennung	276
5.2.2	Verbrennungstemperatur	277
5.2.3	Wärmeabgabe im Flammenraum	281
5.2.4	Max. Flammentemperatur	283
5.2.5	Flammenabmessungen	283
5.2.6	Bestimmung der einzelnen Wärmestromdichten	290
5.2.7	Feuerraumendtemperatur	297
5.2.8	Wärmeaufnahme im Flammenraum durch den Wärmeträger	298
5.2.9	Bauarten von direktbefeueren Erhitzern	303
5.3	Mit Heißgasen beheizte Erhitzer	315
5.4	Erhitzer mit Vorfeuerungen	326
5.5	Erhitzer-Kennfeld	330
5.5.1	Elektrisch beheizte Erhitzer	330
5.5.2	Direkt befeuerte Erhitzer	331
5.6	Beispielberechnung der höchsten Filmtemperatur im Erhitzer	333
5.7	Ablagerungen und Spannungen in der Erhitzer-Rohrwand	344
5.8	Maßnahmen zur Verhinderung von Explosionen im Erhitzer	358
6	Anlagenbauelemente	359
6.1	Beheizung	359
6.1.1	Flüssige Brennstoffe	361
6.1.2	Gasförmige Brennstoffe	375
6.1.3	Feste Brennstoffe	379
6.1.4	Verbrennungstechnische Daten für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe	379
6.1.5	Kennwerte von Brenneranlagen	379
6.1.6	Emissionen	390
6.1.6.1	Kohlendioxid	390
6.1.6.2	SO ₂ und SO ₃	390
6.1.6.3	Kohlenmonoxid	391
6.1.6.4	Kohlenwasserstoffe	391
6.1.6.5	Stickstoffoxide	392
6.1.6.6	Staub	393
6.1.6.7	Technische Möglichkeiten zum Vermindern der staubförmigen Emission	394
6.1.6.8	Zyklone	396
6.1.6.9	Lärm	403
6.1.6.10	Zulässige Grenzwerte	403
6.2	Umwälzpumpen	408
6.2.1	Leistungsbedarf	408
6.2.2	Pumpensysteme	410
6.2.3	Kreiselpumpen	411
6.2.4	Bauarten von Wärmeträgerumwälzpumpen	423
6.2.4.1	Leckfreie Kreiselpumpen mit Spaltrohrmotor	423

6.2.4.2	Antrieb über Permanentmagnet	426
6.2.4.3	Normpumpen mit Wellenabdichtung	429
6.2.5	Allgemeine Hinweise für die Pumpenaufstellung	458
6.2.6	Beachtungsmerkmale bei der Montage und Inbetriebnahme von Pumpenaggregaten	461
6.3	Armaturen	464
6.3.1	Absperrventile	464
6.3.2	Absperrschieber	472
6.3.3	Rückschlagarmaturen	473
6.3.4	Schmutzfänger	480
6.3.5	Regelarmaturen	483
6.3.6	Sicherheitsventile	497
6.3.7	Berstscheiben	499
6.3.8	Bemessung von Sicherheitsorganen	501
6.3.9	Anschlußarten von Armaturen	506
6.3.10	Armaturen-Abmessungen und Kennzeichnung	507
6.4	Rohrleitungen	507
6.4.1	Rohre	507
6.4.2	Rohrdehnungsausgleich	507
6.4.3	Flanschverbindungen	514
6.4.4	Wärmedämmung	524
6.5	Behälter	530
6.5.1	Ausdehnungsbehälter	530
6.5.2	Sammelbehälter	533
6.5.3	Speicherbehälter	533
6.5.4	Behältergestaltung und -bemessung	533
7	Wärmeverbraucher	539
7.1	Wärmebedarfsbestimmung	540
7.1.1	Kontinuierliche Aufheizvorgänge von Medien, die ihren Aggregatzustand nicht ändern	540
7.1.2	Kontinuierliche Aufheizvorgänge von Medien, die ihren Aggregatzustand ändern	540
7.1.3	Diskontinuierliche Aufheizvorgänge	541
7.2	Allgemeine Gestaltungsrichtlinien	544
7.3	Lufterhitzer	546
7.4	Rührgefäße, Behälter und Bäder	547
7.5	Wärmeaustauscher	552
7.6	Dampferzeuger	552
7.7	Brauchwasserbereiter	554
7.8	Zylinderbeheizung	556
7.9	Pressenbeheizung	563
7.10	Verschiedene Möglichkeiten von Heizen und Kühlen mit Speicherbehältern	565
7.11	Heizen – Kühlen – Tiefkühlen (H-K-T)	567
7.12	Druckanstieg bei Wärmeeinwirkung auf eine eingeschlossene Flüssigkeit	570
7.13	Wärmeverbraucher nach Anwendungsgebieten	571
8	Meß-, Steuer- und Regeltechnik (MSR)	575
8.1	Meßtechnik	575

8.1.1	Temperaturmessung	575
8.1.2	Druckmessung	579
8.1.3	Füllstandmessung	580
8.1.4	Durchflußmessung	585
8.2	Regeltechnik	596
8.2.1	Allgemeines	596
8.2.2	Regelung mit Zweipunktregler und Brenneingriff	598
8.2.3	Verbraucherregelung	598
8.2.3.1	Verbraucherregelung mittels Dreiwege-Regelventilen	601
8.2.3.2	Verbraucherregelung mittels Durchgangsregelventilen	603
8.2.3.3	Regelung mit konstantem Volumenstrom durch den Verbraucher	606
8.2.3.4	Regelkaskade	607
8.3	Begrenzungstechnik	608
9	Aufstellungsrichtlinien	611
9.1	Aufstellung der Erhitzer	611
9.2	Heizraumrichtlinien	611
9.2.1	Heizraumanordnung	611
9.2.2	Heizraumgestaltung	611
9.2.3	Heizraumausführungs-Beispiel	614
9.3	Schornsteine	616
9.3.1	Emission und Immission	616
9.3.2	Bemessung des Querschnittes	617
9.3.3	Projektierungshilfen	618
10	Betrieb von Wärmeübertragungsanlagen	623
10.1	Abnahmeprüfung	623
10.2	Reinigung	623
10.3	Dichtheitsprüfung	624
10.4	Füllen der Anlage mit Wärmeträger und Druckprüfung	624
10.5	Funktionsprüfung	626
10.6	Inbetriebnahme	626
10.7	Meßprotokoll	628
10.8	Außerbetriebnahme	629
10.9	Wartung	629
10.9.1	Wärmeträger	629
10.9.2	Erhitzer	634
10.9.3	Sicherheitsgeräte	634
10.9.4	Dichtheit der Anlage	634
10.9.5	Anlagenbauelemente	635
10.10	Instandsetzung	635
11	Gesetze, Verordnungen, Vorschriften, Normen und Richtlinien	637
11.1	Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG)	637
11.2	Richtlinie über Druckgeräte (DGRL)	637
11.2.1	Konformitätsbewertungs-Diagramme	646
11.2.2	Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)	651
11.2.3	Konformitätsbewertungs-Diagramme bei der Prüfung durch eine zugelassene Überwachungsstelle	655

11.3	Regeln der Technik	665
11.3.1	DIN 4754	665
11.3.2	VDI-Richtlinie VDI 3033	666
11.4	Ergänzende Gesetze und Verordnungen	666
11.4.1	Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	666
11.4.2	Umgang mit wassergefährdenden Stoffen.	668
12	Ergänzende Ausführungen zur Wärmeträgertechnik.	671
12.1	Erhitzer in 3-Zug-Bauweise erhöht den Wirkungsgrad.	671
12.2	Temperaturregelung für Wärmeaustauscher	674
12.3	Anlagenplanung für eine Backofenbaureihe	675
12.4	Wärmestabilität nicht ignorieren	685
12.5	Professionelle Temperieranlagen nach Maß	693
12.6	Mit neuer Kälteanlage –100 °C sicher und wirtschaftlich beherrschen	695
12.7	Gasreinigung durch „Thermische Nachverbrennung“ (TNV).	700
12.8	Entwicklung kosteneffizienter Kreislumpumpenbaureihen für den Markt der Wärmeübertragungsanlagen, insbesondere zur Förderung moderner synthetischer Wärmeträgerfluide und Heißwasser.	707
12.9	Armaturen in Wärmeträgerölanlagen.	719
12.10	Die preiswerte Magnetkupplungspumpe mit der Sicherheit einer Spaltrohrmotorpumpe: ALLMAG®-CMA	723
12.11	Schlüsselfertige 12,8-MW-Thermoölanlage für PET-Produktion in Polen	728
12.12	Ein 48-MW-Thermoölsystem für die Erdölgewinnung in China	733
12.13	Über Thermoöl indirekt beheizte ORC-Anlage leistet 1,5 MW	734
12.14	Der sichere Betrieb von Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern.	714
12.15	Organische Wärmeträgerflüssigkeiten und deren sichere Anwendung	739
12.16	Druckguß: Vorteile und Wirtschaftlichkeit von Temperiergeräten für den Betrieb mit Wärmeträgeröl	743
12.17	Temperieren bei tiefen Temperaturen.	744
12.18	Mögliche Fehlerquellen bei der Auslegung von Wärmeträgeranlagen.	749
12.19	Durchlauferhitzer für Wärmeträgeranlagen	759
12.20	Prozesse bis 400 °C isotherm führen	763
12.21	Thermoölwärmeversorgung in einem Holzwerkstoffwerk: Umbaumaßnahmen zur Verbesserung der Wärmeversorgung und -verteilung.	766
12.22	Wärmeträgereinsatz bei verschmutzten Rauchgasen für kontinuierlichen Betrieb	775
12.23	Thermoölbeheizte Öfen in Backbetrieben vom Handwerk bis zur Großindustrie	778
12.24	Wärmeträgeröl für Vorlaufemperaturen bis 400 °C	782
12.25	Feststofffeuerungen mit 2 × 48 MW Feuerungsleistung.	785
12.26	Effiziente und sichere Prozeßwärme mit Therminol®-Wärmeträgerflüssigkeiten.	786
12.27	Wärmeverschiebesystem in einem Dachziegelwerk.	790
12.28	Parabolrinnen-Solkraftwerke – Die größten Thermoölanlagen der Welt	793
13	Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit organischen Fluiden (ORC-Anlagen).	801
13.1	Energie aus Holzverbrennung.	802
13.1.1	Wesentliche Baugruppen einer Holzverbrennungsanlage.	802
13.1.2	Materialsammlung und Lagerung	803
13.1.3	Verbrennung von stückigem Material	807

13.2	Zwischenkreis-Wärmeträgersystem	822
13.2.1	Teil-hydriertes-Terphenyl THT: Zusammensetzung von THT	822
13.2.2	Zersetzung	823
13.2.3	Stoffdaten	829
13.2.4	Dampfdruck	834
13.2.5	Löslichkeit von Zersetzungsprodukten und Beimischungen	844
13.2.6	Fluid-Aufbereitung	847
13.2.7	Fouling und Coking	850
13.2.8	Verhalten von THT gegenüber Konstruktionswerkstoffen	851
13.2.9	Brennbarkeit	852
13.2.10	Notkühlsystem	857
13.2.11	Beachtungsmerkmale bei der Planung von Anlagen mit dem Fluid THT	860
13.3	Turbinenkreislauf mit Silikonöl als Fluid	863
13.4	Hilfssysteme zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Anlagenverfügbarkeit	869
13.4.1	Anforderungen an Wärmeträgerölanlagen mit Holzfeuerungen für ORC-Stromerzeugung	869
13.4.2	Niedrigsiederentfernung (Leichtsiederaustragung)	870
13.4.3	Automatische Nebenstromfilteranlage	873
13.4.4	Stickstoffüberlagerung mit automatischer Regelung	874
13.4.5	Pumpenleckleitungssammelgefäß	875
13.4.6	Spritzschuttringe an Flanschverbindungen	877
13.4.7	Flammendurchschlagsicherungen	877
13.4.8	Probenahmekühler	877
13.4.9	Saugseitige Drucküberwachung der Primärpumpen	879
13.4.10	Notkühlsysteme mit hoher Reserve und Sicherheit	880
13.4.11	Notkamine und Notluftklappen	882
13.4.12	Notschnellentleerungssysteme	883
13.4.13	Heizflächenreinigung	884

14 Gleichungen, Diagramme und Tabellen für die Projektierung von Wärmeträgeranlagen

	in der Flüssigphase	891
14.1	Volumenstrom \dot{V}	891
14.2	Rohrleitungs-Innendurchmesser d_i	893
14.3	Inhalte I	895
14.3.1	Rohrinhalt I_R	895
14.3.2	Apparate – Inhalte I_A	895
14.4	Ausdehnungsvolumen ΔV_{Exp}	898
14.5	Ausdehnungsleitung d_{exp} und Entlüftungsleitung d_{Entl}	900
14.6	Druckverlustberechnung ΔH	901
14.7	Pumpen- und Pumpenmotorleistungsbedarf P_p und P_M	904
14.8	Verhältnis von Wärmeleistung zur Pumpenleistung \dot{Q}/P_p	907
14.9	Meßblende und Drosselblende d_{BL} und d_{Dr}	908
14.10	Wärmeübertragung und Fluid-Dampfdaten	910
14.10.1	Wärmeübergangskoeffizient α	910
14.10.2	Sattdampfdaten	910
14.11	Flammen-, Feuerraum- und Erhitzerabmessungen	911
14.12	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad eines Erhitzers η_F	914
14.13	Brennstoffstrom und Abgasstrom \dot{B} und \dot{V}_A	916
14.14	Ventilatorenleistung P_v	918

14.15 Kamindurchmesser für flüssige und gasförmige Brennstoffe d_k	919
14.16 Rohrverlegung	920
14.17 Festigkeitsberechnungen.....	922
15 Übersichtsdarstellungen von Baugruppen und Formblättern mit Beispielrechnungen	925
16 Stoffdaten von organischen Wärmeträgerfluiden.....	967
17 Einheiten und Umrechnungstabellen	1073
Quellenverzeichnis	1077
Literaturverzeichnis.....	1081
Firmenverzeichnis	1093
Stichwortverzeichnis	1096

Bedeutung der wichtigsten Formelzeichen

Die nachfolgenden wichtigsten Zeichen werden nach Möglichkeit grundsätzlich angewendet, wobei Abweichungen von diesen Formelzeichen jeweils bei den entsprechenden Gleichungen oder Bildern genannt sind.

Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
A	Fläche, Querschnittsfläche	m ²	
B	Brennstoffmenge	kg	
B	Brennstoffstrom	kg/s	
C	Strahlungskonstante	W/(m ² · K ⁴)	
C _s	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	W/(m ² · K ⁴)	C _s = 5,67 · 10 ⁻⁸ W/(m ² · K ⁴)
D	Durchmesser	m	
E	Elastizitätsmodul	Pa	bevorzugt: N/mm ²
E	Energie	J	
F	Kraft	N	
G	Gewichtskraft	N	G = m · g
H	Förderhöhe, Verlusthöhe	m	
H _o	Brennwert, spezifisch	J/kg	
H _u	Heizwert, spezifisch	J/kg	
I	Impuls	Ns	
I	Strom	A	
J	Flächenträgheitsmoment	m ⁴	
L	Länge	m	
M	Moment	N m	
O	Oberfläche	m ²	
P	Leistung	W	
Q	Wärmemenge	J	1 W = J/s
Q	Wärmestrom	W	1 J = 1 Ws
R	Gaskonstante, spezifisch	J/(kg · K)	
S	Sicherheitsfaktor	–	
T	Temperatur, thermodynamisch	K	
U	Umfang	m	
U	Spannung	V	
V	Volumen	m ³	
V	Volumenstrom	m ³ /s	
W	Arbeit	J	
W	Widerstandsmoment	m ³	
a	Beschleunigung	m/s ²	
a	Temperaturleitfähigkeit	m ² /s	
c	Wärmekapazität, spezifisch	J/(kg · K)	
c	Federkoeffizient	N/m	
d	Durchmesser	m	
f	Faktor	–	
f	Frequenz	Hz	1 Hz = 1/s
g	Fallbeschleunigung	m/s ²	g _n = 9,80665 m/s ²
h	Enthalpie	J/kg	
h	Höhe	m	
i	Trägheitsradius	m	

k	k	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² · K)	
	k	Rohrrauigkeitshöhe	m	
m	m	Masse	kg	
	ṁ	Massenstrom	kg/s	
	m	Öffnungsverhältnis	–	
n	n	Drehzahl	1/s	
	n	Luftverhältnis	–	
P		Druck	Pa	1 Pa = 1 N/m ²
q̇		Wärmestromdichte	W/m ²	
Δh _v		Verdampfungsenthalpie, spezifisch	J/kg	
	r	Radius	m	
s		Schichtdicke, Wanddicke	m	
t		Zeit	s	
v		Volumen, spezifisch	m ³ /kg	v = 1/ρ
w		Geschwindigkeit	m/s	
z	ż	Zersetzungsrate	kg/s	
α	α	Längen-Ausdehnungskoeffizient	1/K	
	α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² · K)	
	α	Durchflußzahl	–	
β	β	Volumen-Ausdehnungskoeffizient	1/K	
	β	Winkel	–	
δ		Grenzschichtdicke	m	
ε	ε	Emissionsverhältnis	–	
	ε	Dehnung	–	
ζ		Widerstandsbeiwert	–	
η	η	dynamische Viskosität	Pa s	
	η	Wirkungsgrad	–	
θ		Temperatur, Celsius	°C	
λ	λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)	
	λ	Schlankheitsgrad	–	
	λ	Rohrreibungszahl	–	
		Reibungszahl	–	
μ		Kinematische Viskosität	m ² /s	
ν		Dichte	kg/m ³	
ρ		Spannung	N/m ²	
σ	σ	Oberflächenspannung	N/m	
	σ	Schubspannung, Scherspannung	N/m ²	

Kenngößen

Bi	Biot-Zahl	$= \frac{\alpha \cdot s}{\lambda_w}$
Gr	Grashof-Zahl	$= \frac{d^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta\theta}{\nu^2}$
Nu	Nusselt-Zahl	$= \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$
Pe	Péclet-Zahl	$= \frac{w \cdot d}{a} = \frac{w \cdot d \cdot \rho \cdot c}{\lambda} = Re \cdot Pr$
Pr	Prandtl-Zahl	$= \frac{c \cdot \rho \cdot \nu}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$
Re	Reynolds-Zahl	$= \frac{w \cdot d}{\nu}$

Zur eindeutigen Bezeichnung einer Kenngröße gehören Angaben darüber, wie die verwendeten kennzeichnenden Größen definiert und auf welche Temperatur die Stoffwerte bezogen worden sind.

Vorzeichen

Δ	Differenz
d	differentiell
Σ	Summe

Diakritische Zeichen

–	mittel
·	auf die Zeit bezogene Größe
\wedge	maximal
\vee	minimal
~	wechselnd
'	Zustand, flüssig
"	Zustand, dampfförmig

Indizes

F	Flamme
Fl	Flüssigkeit, Fluid
G	Gas
Gr	Grenzschicht
K	Konvektion
L	Luft, Bezug auf Länge, laminar
N	Nennwert
Q	Querschnitt
R	Rücklauf

S	Strahlung
T	turbulent
V	Vorlauf, Verlust
W	Wand
a	außen
äq	äquivalent
dyn	dynamisch
ges	gesamt
h	hydraulisch
i	innen
log	logarithmisch
n	Normzustand
proj	projiziert
th	theoretisch, thermisch
ü	Überdruck
x	Richtung
y	Richtung
zul	zulässig
ϑ	Bezug auf Temperatur
\perp	senkrecht
	parallel
0	Anfangswert
1	Anfang, Eingang
2	Ende, Ausgang
∞	unendlich

1 Einleitung

Viele technische Verfahren erfordern eine Erwärmung des Produktes auf Temperaturen, die über der Umgebungstemperatur liegen. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Beheizungsmöglichkeiten:

Direkte Beheizung: Hier wird das Produkt überwiegend von außen durch Feuer-gase oder elektrische Heizelemente unmittelbar erwärmt (Bild 1.1).

Indirekte Beheizung: Hier wird zwischen Erhitzer und Wärmeverbraucher, ein im Kreislauf geführtes Wärmeübertragungsmittel (der sogenannte „Wärmeträger“) eingesetzt (Bild 1.2). Diese Art der Beheizung stellt das Grundprinzip einer Wärmeübertragungsanlage dar.

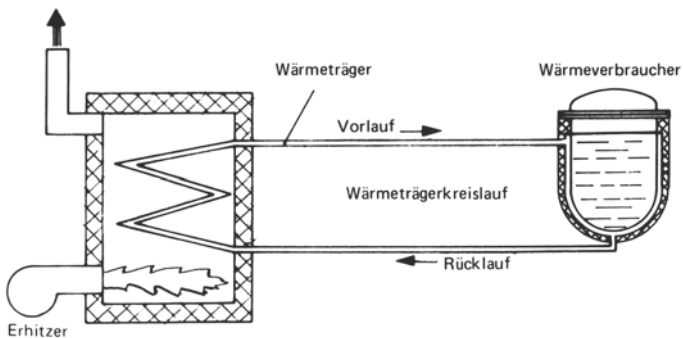
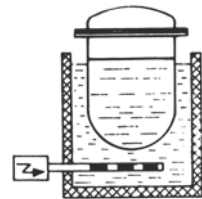


Bild 1.2 Indirekte Beheizung (Wärmeübertragungsanlage)

Eine Wärmeübertragungsanlage (Heat Transfer Plant) liegt vor, wenn der Wärmeträger (vom Erhitzer zum Wärmeverbraucher und zurück) zwischen Begrenzungswänden weitergeleitet wird, an denen keine Wärmeaufnahme oder Wärmeabgabe (mit Ausnahme von natürlichen Wärmeverlusten) erfolgt. Dieses Zwischenbegrenzungssystem für den Transport des Wärmeträgers dient als Definitionsgrundlage der hier behandelten Wärmeübertragungsanlagen.

Anlagen, in denen wohl ein Wärmeträgermedium vorhanden ist, jedoch eine der beiden Mediumbegrenzungswände zugleich Wärmeabgabefläche an den Wärmeverbraucher ist, sollen somit nicht als Wärmeübertragungsanlagen bezeichnet werden.

Als Beispiel eines solchen Systems gilt eine Beheizung nach Bild 1.3. Die Kontaktflüssigkeit im Doppelmantel wird durch eine elektr. Beheizung erwärmt, strömt durch natürlichen Auftrieb nach oben und kühlt sich an der Begrenzungswand ab. Damit ist die Definition einer Wärmeübertragungsanlage nicht erfüllt und man spricht in diesem Falle nicht von einem Wärmeträgerfluid, sondern von einem Kontaktmedium und nicht von einer Wärmeübertragungsanlage, sondern von einem Wärmeübertrager.

Die Vorteile einer Wärmeübertragungsanlage im allgemeinen gegenüber der direkt beheizten Anlage:

1. Örtliche Überhitzungen am aufzuheizenden Wärmegut werden vermieden.
2. Die Temperatur des Wärmegutes kann sehr genau und gleichmäßig geregelt werden. Ebenfalls kann die Vorlauftemperatur den Erfordernissen angepaßt werden.
3. Es ist kein Erhitzer in unmittelbarer Nähe des Verbrauchers erforderlich (Entzündungs- und Explosionsgefahr bei Produktionssicherheitsbestimmungen).
4. Der Erhitzer kann zentral angeordnet werden, und die Wärme wird durch den Wärmeträgerkreislauf an eine oder mehrere Verbraucherstellen abgegeben.
5. Der Wirkungsgrad der zentralbeheizten Anlage ist höher als bei einzelnen direkt beheizten Verbrauchern.
6. Man spart gegenüber einzeln befeuerten Anlagen die Brennstoffzuführung je Feuerungsstätte und die Abgaskamine ein.
7. Direkte Befuerung einzelner Verbraucher erfordert hohen Wartungsaufwand.
8. Die Wärmeübergangsverhältnisse lassen sich am Verbraucher optimal gestalten.
9. Für Heiz- und Kühlvorgänge kann der gleiche Wärmeträger dienen.
10. Es ist eine Speicherung der Wärmeenergie möglich. Diese ist vorteilhaft bei stark schwankendem Wärmebedarf mit hohen kurzzeitigen Spitzenbelastungen.
11. Es ist eine zentrale oder örtliche Umformung auf Warmwasser und Heißwasser über Wärmetauscher sowie Dampf über Dampferzeuger oder Heißluft mittels Lufterhitzer möglich.
12. Eine Umstellung des Brennstoffsystems bei den direkt befeuerten Verbrauchern auf einen anderen Brennstoff ist sehr kostspielig.
13. Die Wärmedämmdicke am Verbraucher kann gering gehalten und örtliche, unzulässige Temperaturspitzen an Wärmeleitbrücken vermieden werden.

Wegen dieser Vorteile der indirekt beheizten Anlage hat sich die Beheizung von Wärmeverbrauchern mittels eines im Umlauf befindlichen Wärmeträgers durchgesetzt (Bild 1.4).

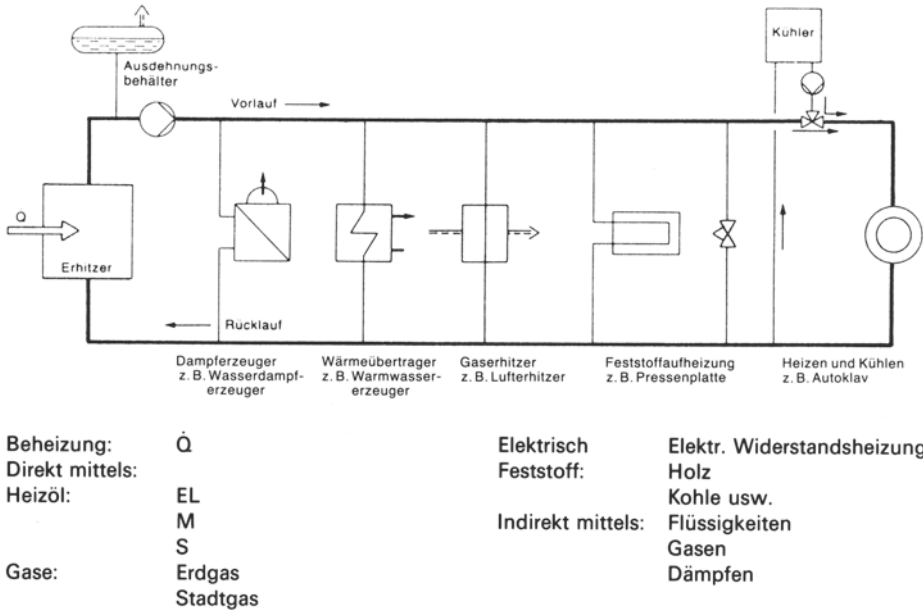


Bild 1.4 Allgemeiner Anlagenaufbau einer Wärmeübertragungsanlage

Geschichtlicher Überblick:

- 1929 ● Patent für den synthetischen Wärmeträger, das eutektische Gemisch – Diphenyl/Diphenyloxid, mit 26,5 Vol.-% Diphenyl und 76,5 Vol.-% Diphenyloxid als azeotropische Flüssigkeit, welche auch in der Dampfphase einsetzbar ist.
Angemeldet von Dow-Chemical.
IG-Farben (jetzt Fa. Bayer) hat ebenfalls ein Patent v. 1931 rückwirkend auf 1929 angemeldet.
- Einsatz in der chemischen Industrie.
- 1938 Baut die Fa. Bertrams die 1. Anlage für die Kunstharzherstellung mit $\vartheta_v = 320^\circ\text{C}$.
- ab ca.
- 1960 ● In verstärktem Maße Wärmeträger auf Mineralölbasis als druckloser Wärmeträger bis 300°C .
- Als 1. weites Einsatzgebiet Anwendung in Wäschereien für Bügelmaschinen.
 - Einsatz von synthetischen Wärmeträgern als Kühlmittel in Atomreaktoren.
- 1962 Anwendung in Bäckereien für Backöfen.
- 1964 Anwendung in der Textilindustrie für Spannrahmen.
- ab ca.
- 1965 Allg. Anwendung in den verschiedensten Industriezweigen.
- 1965 ● Richtlinie Nr. 14 der BG-Chemie.
- Vorläufige Richtlinie des Gewerbeamtes Berlin über Heizungsanlagen mit Heißöl.

-
- 1969 1. VDI-Tagung über Wärmeträgertechnik in Wiesbaden.
 - 1970 VDI-Richtlinie 3033.
 - 1974 DIN 4754.
 - 1974 u. VDI-Tagungen in Ulm und München.
 - 1980 Neuausgabe der DIN 4754.
 - 1990 Neuausgabe der DIN 4754.
 - 1993 Unfallverhütungsvorschrift (VBG 64) „Wärmeträgeranlagen mit organischen Wärmeträgern.“
 - 1994 Neuausgabe der VDI-Richtlinie 3033. Neuausgabe der DIN 4754.
 - 1998 Wärmeträgermedien Q, DIN 51522.
 - 1998 Thermostabilität, DIN 51528.
 - 2000 Prüfung von gebrauchten Wärmeträgermedien, DIN 51529.
 - 2002 Druckgeräterichtlinie 97/23/EG.
 - 2002 Betriebssicherheitsverordnung.
 - 2002 Unfallverhütungsvorschrift (BGV D3) „Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern“
 - 2002 Durchführungsanweisungen zur BGV D3 (BGV D3 DA).

2 Wärmeträgerfluide

2.1 Allgemeines

Damit die Vorteile der indirekten Beheizung durch Wärmeträger für viele Anwendungsfälle ausgenutzt werden können, kommen solche zum Einsatz, die im Betriebszustand flüssig oder dampfförmig sind.

Da jedoch bei dampfförmigem Wärmeträger Überdruck entsteht und Trennungssysteme für Verdampfung und Kondensation erforderlich sind, wird dieses System nur dort angewendet, wo eine Flüssigkeitsumlaufanlage unwirtschaftlich ist.

Die hauptsächlichen Forderungen an Wärmeträgerfluiden sind:

1. Hoher Siedebeginn bei Atmosphärendruck
2. Niedrige Erstarrungstemperatur
3. Gute thermische Stabilität
4. Niedrige Viskosität im gesamten Temperaturbereich (auch im Anfahrzustand)
5. Gute Wärmeübertragungseigenschaften
6. Hohe spezifische Verdampfungsenthalpie (bei Anwendung in Dampfform)
7. Geringe Korrosionsneigung zu den Apparatebaustoffen
8. Nicht giftig und nicht geruchsbelästigend
9. Geringe Empfindlichkeit gegen Fremdstoffe (z. B. Sauerstoff)
10. Geringe Feuergefährlichkeit
11. Geringe Gefährdung der Umgebung bei Leckage
12. Leichte Vernichtungsmöglichkeit (Einschleusbarkeit von verbrauchtem Material in den Naturkreislauf)
13. Wirtschaftlicher Anschaffungspreis.

Es gibt noch kein Fluid, das alle Forderungen in hohem Maße erfüllt (Tabelle 2.1). Es ist daher jeweils der Wärmeträger auszuwählen, der den günstigsten Kompromiß und die wirtschaftlichste Lösung ermöglicht. Anhaltswerte für die z.Z. gebräuchlichsten Wärmeträgerfluide in den verschiedenen Temperaturbereichen nennt Bild 2.1.

- Im Bereich von + 10 bis 150 °C wird überwiegend Wasser, Warmwasser und Heißwasser, verwendet.
- Im Bereich von 150 bis 200 °C wird Wasserdampf eingesetzt, wobei jedoch an der oberen Temperaturgrenze bereits ein reiner Systemüberdruck von 16 bar notwendig wird.
- Für Heizprozesse im Bereich von 200 bis 400 °C werden organische Wärmeträger eingesetzt, wobei die Medien bis 350 °C überdrucklos betrieben werden können. Bei Medien für die oberste Anwendungstemperatur sind lediglich Systemüberdrücke von ca. 10 bar erforderlich.
- Für noch höhere Temperaturen werden neben elektrischer Beheizung flüssige Salze (bis 550 °C), flüssige Metalle (bis 750 °C) und darüber Gasbeheizung, Flammenbeheizung und Strahlungsbeheizung als Wärmeträger eingesetzt.

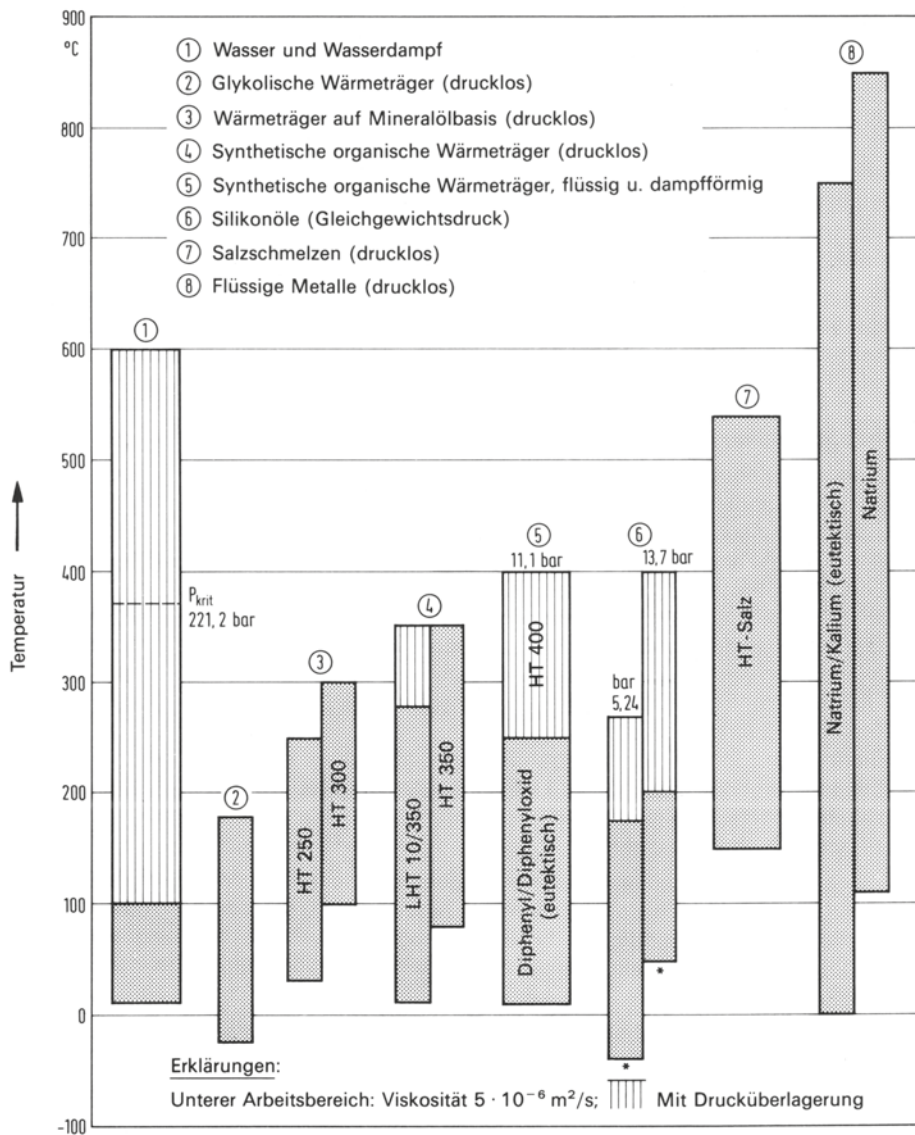


Bild 2.1 Temperaturarbeitsbereiche von flüssigen und dampfförmigen Wärmeträgerfluiden

* Durch den geringen Anstieg der Viskosität bei tiefen Temperaturen kann bei Silikonölen der untere Arbeitsbereich weiter nach unten verschoben werden.

Tabelle 2.1 Verschiedene Wärmeträger mit den für den Wärmeübergang wichtigen Stoffdaten

Medium	Spez. Wärme- kapazität c_p	Spez. Ver- dampfungs- enthalpie Δh_v	Wärme- leitfähig- keit λ
	kJ/(kg · K)	kJ/kg	W/(m · K)
Wasser (H ₂ O) $\vartheta_{Anw.} \approx 5 \text{ bis } 700^\circ\text{C}$	4,2	2257,3 bei 100 °C	0,65
Organische Flüssigkeiten $\vartheta_{Anw.} \approx 50 \text{ bis } 350^\circ\text{C}$	2,1	–	0,11
Diphenyl/Diphenyloxid $\vartheta_{Anw.} \approx 20 \text{ bis } 400^\circ\text{C}$	2,1	ca. 300 bei 256 °C	0,10
Salzschmelzen $\vartheta_{Anw.} \approx 150 \text{ bis } 500^\circ\text{C}$	1,55	–	0,3
Flüssige Metalle (Na) $\vartheta_{Anw.} \approx 100 \text{ bis } 700^\circ\text{C}$	1,3	–	60
Luft und Kohlendioxid $\vartheta_{Anw.} \approx -50 \text{ bis } 1200^\circ\text{C}$	1,0	–	$\approx 0,04$
Helium (He) $\vartheta_{Anw.} \approx -50 \text{ bis } 1200^\circ\text{C}$	5,0	–	$\approx 0,3$

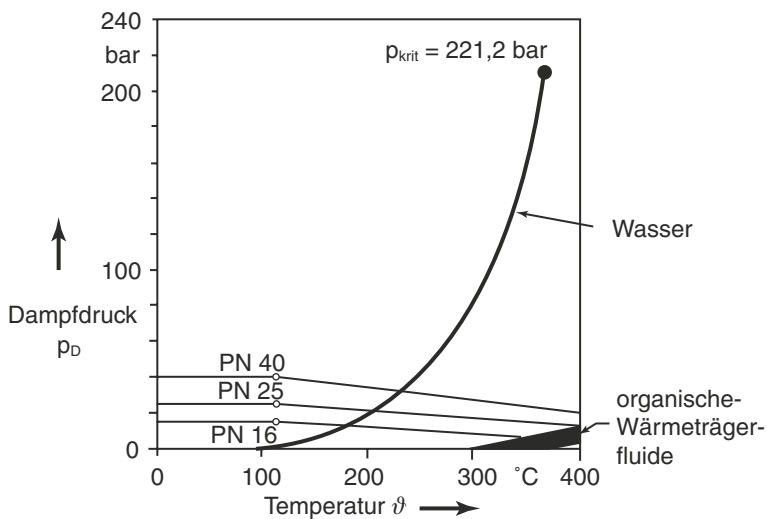


Bild 2.2 Dampfdruckkurven von Wasser und organischen Wärmeträgerfluiden (mit Nenndruckkurven PN)

2.1.1 Wasser und Wasserdampf*)

Wasser ist das am weitesten verbreitete und bekannteste Wärmeübertragungsfluid. Für den Temperaturbereich von 0 bis 100 °C ist Wasser ein idealer Wärmeträger, da die Stoffwerte in diesem Bereich (im Vergleich zu anderen Wärmeträgern) optimal sind, nämlich:

- Siedetemperatur bei Atmosphärendruck = 100 °C
- Erstarrungstemperatur = 0 °C
- Hohe spezifische volum. Wärmekapazität $c \cdot \rho$ = 4200 kJ/(m³ · K)
- Sehr gute Wärmeübergangswerte λ ≈ 0,6 W/(m · K)
- Niedrige Viskosität ν = 1 · 10⁻⁶ m²/s bei 20 °C
- Wirtschaftliche Anwendungsbedingungen z. B. billig, ungiftig usw.

Bei Temperaturen über 100 °C muß der Wärmeträgerkreislauf unter Druck gesetzt werden (Bild 2.2). Dies erfordert bereits bei 200 °C eine druckfeste Anlage, ausgelegt für mindestens 16 bar.

Dadurch ergeben sich teure druckbelastete Anlagen, für die umfangreiche sicherheitstechnische Auflagen bestehen. Wegen der hohen Verdampfungsenthalpie von Wasser, 2257,3 kJ/kg bei 100 °C, und der großen Wärmetransportmöglichkeit hat sich, trotz des erforderlichen Kondensatnetzes, Wasserdampf als Wärmeträger ab etwa 150 °C gegenüber dem Heißwasser durchgesetzt.

Jedoch treten bei Wasser- und Wasserdampfanlagen Korrosions- und Ablagerungs- bzw. Verkrustungsprobleme auf, die eine Vorschaltung von Wasseraufbereitungsanlagen erfordern, da absolut reines Wasser in der Natur nicht vorkommt. Das Rohwasser und das von den Wasserwerken gelieferte Wasser enthält immer eine mehr oder weniger große Zahl von Beimengungen und Verunreinigungen. Wasser spaltet Verunreinigungen wie Salze, Säuren und Basen in Ionen.

Für die Korrosion sind hauptsächlich die im Wasser gelösten Gase wie *Sauerstoff* (O₂) und *Kohlendioxid* (CO₂) verantwortlich. Zur Beurteilung des korrosionsfördernden Verhaltens von Wasser dient u. a. der „pH-Wert“, ein Maß für die Wasserstoffionen-Konzentration in wässrigen Lösungen. Trotz der Vielseitigkeit der Korrosionserscheinungen ist die Ursache der Korrosion in allen Fällen dieselbe: Das korrodierende Metall ist bestrebt, sich in seine chemische Verbindung zurückzuverwandeln.

Die Versteinerung der Apparatewerkstoffe ist darauf zurückzuführen, daß sich bei Erwärmung des Wassers, vorzugsweise bei über 55 °C, an den Wandungen Kesselstein bildet, der den Wärmedurchgang verringert und die Querschnitte verengt. Die Ursache ist der Salzgehalt (gelöste Salze von Calcium und Magnesium) des Wassers. Ein Maß für den Salzgehalt gibt die „Härte“ an. Weitere Stoffdaten s. [2.1].

Wasserdampf*)

Er unterscheidet sich von Gasen lediglich dadurch, daß dieser sich leicht verflüssigen läßt. Die Zustandsgleichung für das ideale Gas $p \cdot v = R \cdot T$ gilt jedoch nur für Dämpfe bei kleinem Druck und hoher Temperatur. Stoffdaten s. z. B. [2.2].

*) Weitere Informationen siehe Fachbuch Wagner: *Wasser und Wasserdampf in Anlagenbau*, Würzburg, Vogel Buchverlag.

2.1.2 Salzschmelzen

Im Temperaturbereich von 400 °C bis 550 °C werden in zunehmendem Maße Salzschmelzen als Wärmeträger eingesetzt.

Am häufigsten wird heute ein trinäres eutektisches Gemisch verwendet, bestehend aus:

- 53% Kaliumnitrat (KNO_3)
- 40% Natriumnitrit (NaNO_2)
- 7% Natriumnitrat (NaNO_3)

Manchmal wird auch ein Zweistoffgemisch, wie zum Beispiel Natriumnitrit (45%) und Kaliumnitrat (55%), angewandt.

Wichtige Eigenschaften und Stoffwerte

- nicht brennbar
- keine Explosionsgefahr
- austretende Dämpfe sind nicht giftig.

Schmelzpunkt:

$$\vartheta_{\text{Sch}} = 142\text{ °C}$$

Der Gefrierpunkt des erwähnten eutektischen Dreistoffgemisches liegt bei 142 °C und verändert sich, abhängig von der Zusammensetzung, wie Bild 2.3 darstellt.

Dichte:

$\rho = 2000\text{ kg/m}^3$ bei 150 °C und fällt linear auf
 $\rho = 1650\text{ kg/m}^3$ bei 600 °C ab.
 Schüttdichte $\rho \approx 1200\text{ kg/m}^3$

Kinematische Viskosität:

$\nu \approx 10 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ bei 150 °C und fällt exponential auf den bei der Betriebstemperatur von 400 bis 550 °C etwa konstanten Wert von $0,8 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ab.

Spezifische Wärmekapazität:

$c \approx 1,55\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Für festes Salz $c \approx 1,34\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Wärmeleitfähigkeit:

$\lambda \approx 0,3\text{ W}/(\text{mK})$ bei 500 °C und $0,44\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei 150 °C.

Ausdehnungskoeffizient:

Festes Salz: $\beta = 0,00159\text{ Vol.-%/K}$
 Salzschmelze: $\beta = 0,0112\text{ Vol.-%/K}$

Thermische Stabilität:

Bis 455 °C ist die Zersetzungsrate ≈ 0 und somit als thermisch beständig zu bezeichnen.

Zwischen 455 °C und 540 °C tritt eine langsame thermische Zersetzung der Nitrite zu Nitraten, Natriumoxiden und Stickstoff auf:



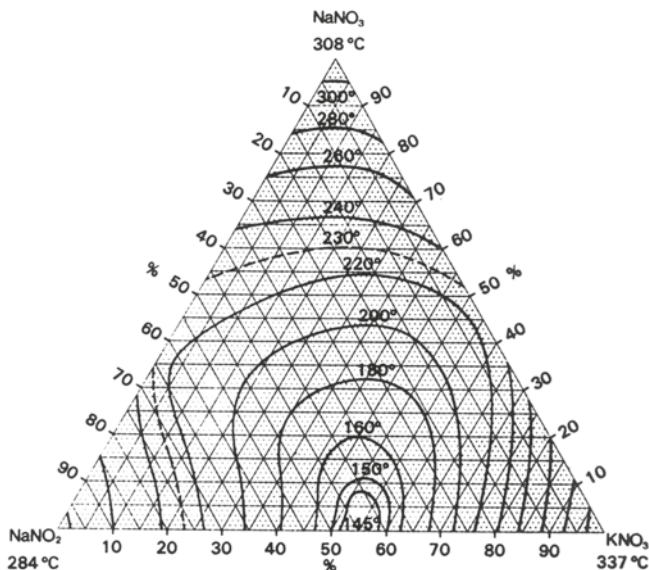
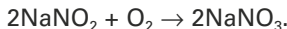


Bild 2.3 Abhängigkeit der Schmelztemperatur von der Zusammensetzung der Salzschnmelze

Ebenfalls tritt zwischen 455°C und 540°C eine Oxidation des Natriumnitrits auf, wenn die Anlage mit der Atmosphäre in Verbindung steht:



Diese Reaktion kann durch Inertgasabdeckung (z. B. N_2) des Sammelbehälters vermieden werden.

Über 820°C ist die Bildung von Stickstoff bei der thermischen Zersetzung so stark, daß die Salzschnmelze regelrecht „kocht“.

Die Veränderung der Zusammensetzung durch thermische Zersetzung hat eine Erhöhung des Schmelzpunktes zur Folge.

Korrosionsverhalten

Bei einer Abtragsrate von 0,1 mm/Jahr können bis:

470°C ferritische warmfeste Stähle verwendet werden. Über 470°C empfiehlt sich die Verwendung von austenitischen Stählen. Weitere Stoffdaten siehe [2.3], [2.4] u. [2.5]. Leichtmetalle soll man in Wärmeträgersalzanlagen nicht verwenden. Die Oxidation solcher Metalle kann explosionsartig ablaufen. Ebenfalls soll man den Einsatz von Gußeisen vermeiden. Warmfeste Gußeisstücke sind für Pumpen und Armaturen jedoch brauchbar.

Regeneration von Wärmeträgersalz

Durch periodische Analysen und Schmelzpunktbestimmungen läßt sich die Veränderung der Zusammensetzung überwachen. Bei Anlagen, in denen die Vorwär-

mung und das Schmelzen des Wärmeträgersalzes mittels Heißdampf erfolgt ist nach einem gewissen Schmelzpunktanstieg eine Regeneration unumgänglich.

Durch Abziehen eines Teiles des durch Zersetzung veränderten Wärmeträgersalzes und anschließendes Zugeben eines aus zwei Komponenten bestehenden Salzgemisches kann der Schmelzpunkt herabgesetzt werden. Ob sich der Schmelzpunkt bis auf 142 °C herabsetzen läßt, hängt von den örtlichen Bedingungen (zum Beispiel Druck des zur Verfügung stehenden Heißdampfes) ab. Meist genügt ein teilweises Regenerieren. Dabei wird die Salzfällung, bzw. ein Teil davon, dem System in flüssiger Phase (Temperatur ca. 200 °C) entnommen. Entweder wird die Flüssigkeit mittels Stickstoff über ein Tauchrohr aus dem Behälter hinausgedrückt, oder es wird eine Tauchpumpe über das geöffnete Mannloch des Salzbehälters eingebracht. Das abgezogene, flüssige Salz wird in Eisenfässer abgefüllt, wo es langsam kristallisiert, und die neue Ersatzmischung anschließend als Granulat in das System eingefüllt.

2.1.3 Flüssige Metalle

Im Temperaturbereich von 500 °C bis 800 °C werden bevorzugt die Alkalimetalle Natrium und Kalium sowie Legierungen aus beiden Metallen als flüssiger Wärmeträger eingesetzt.

Der hohe Siedepunkt (bei Atmosphärendruck: Na bei 983 °C und K bei 760 °C) in Verbindung mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit ($\lambda \approx 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) läßt die flüssigen Metalle besonders vorteilhaft erscheinen.

Eine Legierung von 44 Gew.-% Kalium und 56 Gew.-% Natrium, das sog. „NaK 44“, hat einen Schmelzpunkt von 19 °C. Die eutektische Legierung (22 Gew.-% Na und 78 Gew.-% K „NaK 78“) hat sogar einen Schmelzpunkt von -11 °C.

Natrium ist ein silberweißes, sehr reaktionsfreudiges Metall. Bereits bei Raumtemperatur reagiert es mit Sauerstoff (z. B. aus CO_2 u. H_2O) sehr heftig, mit Wasser unter Bildung von Na_2O bzw. NaOH . Diese Natronlauge zerstört lebende Organismen und ist daher gefährlich. Mit steigender Temperatur wächst die Reaktionsgeschwindigkeit so, daß die Berührung von Wasser und Natrium bei hohen Temperaturen zur Explosion unter Flammeneerscheinung führt.

Daraus entsteht die Forderung, beim Wärmeaustausch zwischen flüssigem Natrium und Wasser eine gegenseitige Berührung unter allen Umständen auszuschließen.

Für das Korrosionsverhalten gegenüber dem Kreislaufwerkstoff, sowie für das Verstopfen von Rohrleitungen, ist der Sauerstoffgehalt, der in Form von Na_2O vorliegt, ausschlaggebend. Die Löslichkeit von Na_2O in flüssigem Natrium ist temperaturabhängig.

Der Gehalt am Na_2O (Natriumoxid) kann durch Kühlfallen, die den kältesten Teil des Kreislaufes darstellen, reduziert werden. Die Temperatur in der Kühlfalle wird dabei so weit abgekühlt, daß die Sättigungstemperatur der im Alkalimetall gelösten Sauerstoffverbindung unterschritten wird. Die Oxide fallen in kristalliner Form aus und werden durch Füllmaterial in der Kühlfalle zurückgehalten. Die Sauerstoffkonzentration sollte unter 20 ppm gehalten und kann mit dem sogenannten „Plugging-Meter“ gemessen werden.

Werkstoffe für das Kreislaufsystem:

Bis 590 °C ferritische „warmfeste Stähle“

z.B. 10 Cr Mo 9–10

Werkstoff Nr.: 1.7380

Über 590 °C austenitische „warmfeste Stähle“

z.B. X 8 Cr Ni Nb 16–13

Werkstoff Nr.: 1.4961

Wärmeübertragung der flüssigen Metalle:

Die Viskosität des flüssigen Natriums hat bei 400 °C bereits den Wert von Wasser. Sein Strömungsverhalten ist daher dem Wasser sehr ähnlich, zumal die Dichte nur unwesentlich abweicht.

Für die Wärmeübertragung gelten dieselben Überlegungen wie für jede nicht-metallische Flüssigkeit. Zwei Gesichtspunkte sind aber besonders zu beachten:

1. Die hohe Wärmeleitfähigkeit erhöht den relativen Einfluß der Wärmeleitung in der Grenzschicht (und damit auch den Einfluß von Verschmutzungen, z.B. Oxidschichten).
2. Die hohe Wärmeleitfähigkeit tritt merklich gegenüber der Turbulenzwirkung bei erzwungener turbulenter Strömung in Erscheinung.

Für die Rohrströmung gilt (reine Innenfläche) für laminare und turbulente Strömung:

$$\alpha = [4,5 + 0,014 (\text{Re} \cdot \text{Pr})^{0,8}] \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (2.1)$$

Weitere Stoffdaten s. [2.3] u. [2.6].

Vergleich verschiedener flüssiger Wärmeträger siehe Tabelle 2.2.

2.2 Organische Wärmeträger¹⁾

Um die Nachteile zu vermeiden, die sich beim Einsatz von Heißwasser und Wasserdampf ergeben, werden im Temperaturbereich zwischen –100 °C und 400 °C zunehmend organische Wärmeträgermedien eingesetzt.

Die wesentlichsten Vorteile gegenüber Wasser und Wasserdampf sind:

- hoher Siedebeginn bei Atmosphärendruck, wodurch „drucklose“ Anlagen bis etwa 350 °C möglich sind,
- keine Korrosions- und Verkrustungsneigung zu den Werkstoffen und somit keine Aufbereitung des Wärmeträgers erforderlich,
- keine Ausdehnung beim Erstarren und somit keine Frostschäden.

2.2.1 Allgemeines

Wärmeträgeröle werden grundsätzlich unterteilt in Öle auf Mineralölbasis und synthetische Öle (verwandte Kohlenwasserstoffe). Da für das Verständnis der Thermostabilität sowie für die Untersuchungsmethoden der Molekülaufbau wesentlich ist, sollen die wichtigsten Grundbegriffe hier aufgeführt werden.

¹⁾ Allgemeiner Begriff: organische Wärmeträgerfluide (Heat Transfer Fluids: HTFs)