

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ausrichtung	1
1.2 Konzept	1
I Grundlagen	3
2 Kälteversorgung	5
2.1 Einordnung, Begriffe, Definitionen	5
2.2 Verbraucher	6
2.2.1 Anwendungsbereiche	6
2.2.2 Bedarf	8
2.2.3 Raumkühlung, Klimatisierung	8
2.2.4 Kühlung technischer Prozesse	9
2.3 Kältemaschinen	10
2.3.1 Übersicht	10
2.3.2 Thermodynamische Aspekte	11
2.3.3 Kompressionskältemaschinen	14
2.3.3.1 Funktion und Aufbau	14
2.3.3.2 Verdichter	17
2.3.3.3 Kältemittel	21
2.3.3.4 Verflüssiger	22
2.3.3.5 Verdampfer	26
2.3.4 Absorptionskältemaschinen	27
2.3.4.1 Übersicht	27
2.3.4.2 Einstufige H_2O -LiBr-Absorptionskältemaschinen	28
2.3.4.3 Betriebsverhalten	33
2.3.4.4 Vergleichende Betrachtung	35
2.3.5 Adsorptionskältemaschinen	37
2.3.5.1 Aufbau und Funktion	37
2.3.5.2 Betrieb, Einsatz, Vergleich	40
2.3.6 Dampfstrahlkältemaschinen	42
2.3.6.1 Prinzip der Verdichtung	42
2.3.6.2 Anlagenaufbau und -funktion, Betrieb	45
2.3.6.3 Einsatz	47
2.3.7 Rückkühltechnik	47

2.3.7.1	Prinzip	48
2.3.7.2	Trockenkühlurm	49
2.3.7.3	Nasskühlurm	49
2.3.7.4	Hybridkühlurm	52
2.3.7.5	Einsatz von Wasser in offenen Kreisläufen	53
2.3.7.6	Systemeinbindung, Aufstellung	54
2.3.7.7	Auslegung	55
2.3.7.8	Sonderverfahren	55
2.3.8	Bauarten, Typen, Einsatz	57
2.3.8.1	Luftkühlung	57
2.3.8.2	Wasserkühlung	58
2.4	Kältequellen	60
2.4.1	Atmosphäre	60
2.4.1.1	Direkte Nutzung und Speicherbeladung	61
2.4.1.2	Künstliche Herstellung von Schnee	62
2.4.2	Erdreich	63
2.4.2.1	Oberflächennahe Geothermie	63
2.4.2.2	Tiefengeothermie	64
2.4.3	Gewässer	64
2.4.3.1	Nutzung des Wassers	64
2.4.3.2	Eisabbau	65
2.4.4	Technische Prozesse	66
2.4.4.1	Sonderverfahren	68
2.5	Kaltwassersysteme	68
2.5.1	Zentrale Erzeugung	69
2.5.2	Netze	70
2.5.2.1	Struktur, Aufbau	70
2.5.2.2	Auslegung	73
2.5.2.3	Übergabestationen	76
2.5.2.4	Betriebsverhalten	78
2.5.3	Leittechnik	84
2.5.4	Rechtliche Aspekte	91
3	Vorgelagerte Energieversorgung	93
3.1	Energiequellen	93
3.2	Elektroenergie	94
3.3	Wärme	99
3.4	Fazit	104
4	Thermische Energiespeicher	109
4.1	Allgemeines	109
4.2	Definitionen	110
4.3	Systematisierung	119
4.3.1	Grundlegende Speicherfunktionen	119
4.3.2	Nutzung von Effekten	121

4.3.2.1	Temperaturänderung	121
4.3.2.2	Phasenwechsel	123
4.3.2.3	Sorption	124
4.3.2.4	Chemische Reaktion	126
4.3.3	Einfluss von Größe und Form	126
4.3.4	Zu- und Abfluss bei direkter Be- und Entladung	128
4.3.4.1	Verdrängungsspeicher	128
4.3.4.2	Umladespeicher	130
4.3.5	Hydraulische Einbindung und Position des Speichers im System .	131
4.4	Eigenschaften und Anforderungen	132
4.4.1	Merkmale, Vorteile, Einsatzmöglichkeiten	132
4.4.2	Limitierende Faktoren	135
4.4.3	Auswahlkriterien	135
4.4.4	Anforderung von Herstellern	136
4.5	Einsatzgebiete bei der Wärmespeicherung	136

II Kältespeicherung 141

5	Speicherstoffe	143
5.1	Mehrstoffsysteme	143
5.1.1	Volumetrische Effektivwerte für Stoffsysteme	143
5.1.2	Wärmeleitfähigkeit	143
5.1.3	Innere Oberfläche	144
5.1.4	Permeabilität und effektiver Druckverlust	144
5.2	Direkte Speicherung mit und ohne Phasenwechsel	145
5.2.1	Speicher ohne latente Effekte	145
5.2.2	Speicher mit latenten Effekten	148
5.2.3	Diskussion	149
5.3	Flüssigkeiten und Feststoffe	149
5.3.1	Kälteträger	150
5.3.1.1	Wasser	150
5.3.1.2	Wasser-Gemische	151
5.3.2	Konstruktionswerk- und Baustoffe	156
5.4	Phasenwechselstoffe	158
5.4.1	Erstarrungs- und Schmelzverhalten	158
5.4.1.1	Unterkühlung und Kristallisation	158
5.4.1.2	System mit einer Komponente	160
5.4.1.3	System mit mehreren Komponenten	161
5.4.1.4	Phasentrennung	162
5.4.2	Wassereis	162
5.4.3	Schnee	163
5.4.4	Eisbrei	165
5.4.5	Paraffine und -gemische	165
5.4.6	Salzhydrate und -gemische	167

5.4.7	Mehrwertige Alkohole	169
5.4.8	Fettsäuren	169
5.4.9	Besonderheiten	171
5.4.10	Verarbeitung von PCMs	172
5.4.10.1	Verkapselung	173
5.4.10.2	Einlagerung	175
5.4.10.3	Verbesserung des inneren Wärmeübergangs	177
5.4.10.4	Vermeidung von Unterkühlung	178
5.4.10.5	Mischung verschiedener PCMs	179
5.4.10.6	Direkter Kontakt mit Wärme- und Kälteträger	180
5.4.10.7	Fluide Stoffsysteme mit Phasenwechselstoffen	182
5.4.11	Kältemischungen	186
5.4.12	Beispiele	186
5.4.12.1	Paraffin-Kühlenergiespeicher mit innen liegendem Wärmeübertrager	188
5.4.12.2	Speicher mit makroverkapselten PCMs	189
5.5	Sorptive Stoffsysteme	190
5.5.1	Feste Sorbenzien	191
5.5.1.1	Zeolithe	191
5.5.1.2	Silikagel	192
5.5.2	Physisorption von Wasser	193
5.5.3	Indirekte Speicherung mit Adsorption	195
5.5.4	Speicher mit Zeolithen	198
6	Systemaspekte	201
6.1	Bewertungsgrößen für Erzeuger, Speicher und Lasten	201
6.2	Einteilung von Leistungs- und Lastbereichen	203
6.3	Kurzzeit-Speicher-Einsatz	203
6.3.1	Betriebsstrategien	204
6.3.2	Betriebsweisen	205
6.3.3	Auswirkungen	205
6.3.4	Betrachtung zu Engpässen	208
6.3.5	Lastprognose und Anpassung der Beladung	210
6.4	Langzeit-Speicher-Einsatz	212
6.4.1	Grundlegende Merkmale	212
6.4.2	Kombinierte Kälte- und Wärmespeicherung	213
6.5	Entwurf, Untersuchung, Planung großer Systeme	214
6.5.1	Vorgehen	214
6.5.2	Anforderungen, Randbedingungen	215
6.5.3	Lastbestimmung	216
6.5.4	Anlagensimulation	217
7	Kaltwasserspeicher	219
7.1	Anforderungen	219
7.1.1	Funktion	219

7.1.2	Konstruktion	220
7.1.3	Betrieb	220
7.1.4	Allgemein	220
7.2	Konstruktive Aspekte	222
7.2.1	Wärmedämmung	222
7.2.2	Abdichtung	224
7.2.2.1	Flächen	225
7.2.2.2	Fugen	227
7.2.3	Einsatz von Wasser-Gemischen	228
7.3	Tankspeicher	228
7.3.1	Einordnung	228
7.3.2	Stahl-Tankspeicher	229
7.3.2.1	Allgemeines	229
7.3.2.2	Druckbehälter	230
7.3.2.3	Flachboden tank	231
7.3.2.4	Wandaufbau	234
7.3.2.5	Bodenaufbau	236
7.3.2.6	Dachbereich	237
7.3.2.7	Inneres Tragwerk	242
7.3.3	GFK-Tankspeicher	244
7.3.3.1	Werkstoffe, Wandaufbau	244
7.3.3.2	Speicher in Segmentbauweise	245
7.3.4	Beton-Tankspeicher	247
7.3.4.1	Werkstoffe	247
7.3.4.2	Konstruktion und Technologie	248
7.4	Beckenspeicher	252
7.4.1	Konstruktion und Bautechnik	252
7.5	Direkte Be- und Entladung	256
7.5.1	Prinzipien	256
7.5.1.1	Verdrängungs- und Umladespeicher	256
7.5.1.2	Stromführung	257
7.5.1.3	Trennung der Zonen	257
7.5.1.4	Speichergestaltung	258
7.5.2	Schichtungsbetrieb	259
7.5.2.1	Schichtenmodellansatz und Kenngrößen	260
7.5.2.2	Ladezustand	261
7.5.2.3	Temperaturgradient	262
7.5.2.4	Höhe der Übergangszone	262
7.5.2.5	Bestimmung der Temperaturverteilung	263
7.5.2.6	Mittlere Temperatur in der kalten Zone	265
7.5.3	Be- und Entladeeinrichtung	265
7.5.3.1	Diffusoren	266
7.5.3.2	Anordnung und Verrohrung	269
7.6	Systemintegration	272
7.6.1	Schaltungen	272

7.6.1.1	Speicher ohne Druckentkopplung	273
7.6.1.2	Speicher mit Druckerhöhung und -minderung	274
7.6.1.3	Speicher mit Wärmeübertragern	275
7.6.2	Betrieb	276
7.6.2.1	Übergabe von Messwerten	276
7.6.2.2	Ansätze auf Basis der Volumenströme	277
8	Eis- und Schneespeicher	281
8.1	Herstellung und Transport von Eis	281
8.1.1	Blockeis	282
8.1.2	Röhreneis	283
8.1.3	Platteneis	284
8.1.4	Scherben- und Schuppeneis	285
8.1.5	Eisbrei	286
8.1.6	Transport von kleinen Eisstücken	290
8.1.7	Lagerung von kleinstückigem Eis	290
8.2	Speicherung und Anwendung von künstlichem Eis	291
8.2.1	Systematisierung	291
8.2.2	Systeme mit innenliegendem Wärmeübertrager	292
8.2.2.1	Externe Schmelze	295
8.2.2.2	Interne Schmelze	296
8.2.2.3	Hybride Konzepte	300
8.2.3	Systeme mit Eiserntemaschinen	300
8.2.4	Systeme mit gekapseltem Eis	306
8.2.5	Systeme mit Eisbrei	310
8.3	Nutzung von natürlichem und künstlichem Schnee	315
8.3.1	Historische Entwicklung	315
8.3.2	Motivation und Voraussetzungen	315
8.3.3	Aufbau und Funktion	315
8.3.4	Beispiele	317
8.3.4.1	Beckenspeicher in Sundsvall (Schweden)	317
8.3.4.2	Schneeanwendungen in Japan	318
8.3.4.3	Schneeentsorgung Flughafen Arlanda (Schweden)	319
9	Speicher im Untergrund	321
9.1	Thermische Nutzung des Untergrundes	321
9.1.1	Motivation und Konzept	321
9.1.2	Rechtliche Aspekte	322
9.2	Aquiferspeicher	324
9.2.1	Begriffe	324
9.2.2	Aufbau und Funktion	324
9.2.2.1	Prinzip, Einordnung, Standorte	324
9.2.2.2	Schaltungen, Anordnungen	326
9.2.2.3	Spezielle Anforderungen	329
9.2.3	Grundwasserströmung	330

9.2.4	Stand der Technik	332
9.3	Erdsondenspeicher	333
9.3.1	Aufbau von vertikalen Erdsonden, Technologie	334
9.3.2	Thermal Response Test	336
9.3.3	Sondenfelder, Speicher	342
9.3.3.1	Aufbau, Funktion, Integration	342
9.3.3.2	Einordnung	342
9.4	Kavernenspeicher	343
9.4.1	Begriffe und Einordnung	343
9.4.2	Aufbau und Funktion	344
9.4.3	Beispiel	344
9.5	Fundamentspeicher	344
9.5.1	Aufbau und Funktion	344
9.5.2	Beispiel	346
9.6	Hybride Konzepte	347
9.6.1	Kopplung von Speichern	347
9.6.2	Hybrider Speicheraufbau	348
Quellenverzeichnis		351
A	Kaltwasserspeicher – Beispielprojekt	375
A.1	Einleitung	375
A.2	Fernkälte in Chemnitz	375
A.2.1	Bestandssystem (1993-2006)	375
A.2.2	Speichernachrüstung (2007)	376
A.2.3	Energiewirtschaft und Betrieb	376
A.3	Kaltwasserspeicher	378
B	Berechnung von Nah- und Fernkältesystemen mit und ohne Speicher	381
B.1	Bilanzierung	382
B.2	Leistungen und Lasten	384
B.3	Verbrauch	385
B.3.1	Grundlegende Aspekte zur Anwendung von Kennzahlen	385
B.3.2	Kältemaschinen	386
B.3.3	Hilfsenergie und -stoffe	387
B.3.4	Berechnungsansatz	389
B.4	Kostenberechnung	390
B.4.1	Jahres-Gesamtkosten	390
B.4.2	Kapitalkosten	390
B.4.3	Verbrauchsgebundene Kosten	391
B.4.4	Betriebsgebundene Kosten	392
B.4.5	Sonstige Kosten	392
B.4.6	Bemerkungen	392
B.5	Speichererrichtungskosten	393

C Anlagensimulation und Berechnungen für den Einsatz von Kaltwasserspeichern	397
C.1 Randbedingungen	397
C.2 Anlagensimulation	399
C.3 Übergeordnete Berechnungen	403
C.4 Ergebnisse und Auswertung	406
D TRNSYS-Modell für oberirdische Kaltwasserspeicher	417
D.1 Einleitung, Motivation	417
D.2 Modellierung	417
D.3 Implementierung und numerische Lösung	420
D.4 Validierung und Diskussion	424
E Radiale Diffusoren	427
E.1 Strömung im Diffusor	427
E.1.1 Grundlagen	427
E.1.2 Untersuchungsobjekt	428
E.1.3 Verteilung des Volumenstroms	428
E.1.4 Auslegung	429
E.1.5 Untersuchungen für ideale Randbedingungen	431
E.1.6 Untersuchungen für reale Randbedingungen	433
E.1.7 Schlussbemerkungen	435
E.2 Schichtungsaufbau im Nahfeld	435
E.2.1 Bedeutung und Voraarbeiten	436
E.2.2 Strömungsmechanische Beschreibung	438
E.2.3 Modellierung	439
E.2.4 Aufbau der Schichtung	441
E.2.5 Bewertung der thermischen Schichtung	443
E.2.6 Variation des Volumenstroms	444
E.2.7 Änderung des Wandabstands	447
E.2.8 Schlussbemerkungen	454
E.3 Dichteinversion	455
F Betrieb von Kaltwasserspeichern	457
F.1 Sommerbetrieb	457
F.1.1 Betriebsweise	457
F.1.2 Randbedingungen	457
F.1.3 Schichtungsverhalten	458
F.2 Winterbetrieb	458
F.2.1 Betriebsweise	458
F.2.2 Randbedingungen	461
F.2.3 Schichtungsverhalten	462
F.3 Zusammenfassung	463
Sachwortregister	469