

Pompen en compressoren

Uitgeverij Academia Press
Coupure Rechts 88
9000 Gent
België

www.academiapress.be

Uitgeverij Academia Press maakt deel uit van Lannoo Uitgeverij, de boeken- en multimediativisie van Uitgeverij Lannoo nv.

ISBN 978 94 014 9591 2
D/2024/45/147 NUR 950

Marc Borremans
Pompen & compressoren
Gent, Academia Press, 2024, 722 p.

Zesde, totaal herwerkte druk, 2024
Vijfde (herwerkte) druk, 2020
Vierde (herwerkte) druk, 2018
Derde (ongewijzigde) druk, 2017
Tweede (herwerkte) druk, 2015
Eerste druk, 2010

Cover: Shutterstock

© Marc Borremans & Uitgeverij Lannoo nv, Tielt

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Pompen & compressoren

ir. Marc Borremans



ACADEMIA
PRESS

ir. Charlotte Borremans, Master of Science Applied Engineering (Biomedical Engineering)
dr. Vladimir Machkaoutsan, Master of Science (Physics,) PhD (Physics)
em. prof. dr ir Christian Lacor, Master Applied Engineering (Electromechanics), Phd, VUB
dr. Martin Obst, Master of Science (Chemistry), Phd Science (Organic Chemistry) KUL
dr. ir. Stéphane Bronckers, Master of Applied Engineering (Electronics), PhD VUB, expert Wind
prof. dr. ir. Wim Deferme, Master of Applied Engineering, Phd, UHasselt
em. prof. dr. ir. Jan Cornelis, Master of Applied Engineering (Electromechanical Engineer), Phd, VUB
ir Johny Lanckriet, Master Applied Engineering (Electromechanics), Voormalig Hoofdingenieur Rollend Materieel (tram, bus, metro), MIVB
Wim De Mesmaeker, Master Industrial Engineering, Master Integral Service Management, Manager Service KSB, Lecturer Plantyn University College, Antwerp, Belgium
em. prof. dr. ir. Jan Wastiels, Master Applied Engineering (Bouwkunde), Phd, VUB
dr. ir. Fabry, Atlas Copco Airpower (R&D), Gasprofessor UHasselt

Dank aan ir. Rogiers, Lecturer aan de KUL en UHasselt voor een aantal oefeningen en inspiratie.

Voorwoord bij de zesde druk

In de zesde druk is er heel wat extra informatie bijgekomen. Praktisch alle hoofdstukken zijn herwerkt, sommige gedeeltelijk, sommige geheel. Op aanvraag van lezers bevat het boek nu ook beschrijving van meettoestellen van druk, temperatuur, debiet enz.. en stromingsmechanica (fluidum statica en fluidum dynamica). Er werden tevens twee aparte hoofdstukken (Basis Thermodynamica en Gasdynamica) besteed aan de thermodynamica, omdat dit uiteindelijk toch de ook de basis vormt voor de studie van Pompen en Compressoren. De thermodynamica bevat enkel dingen die verondersteld worden gekend zijn om de studie van Pompen en Compressoren aan te vangen. Er werd niet ingegaan op onderwerpen als kringprocessen en entropie van irreversibele processen buiten wrijving, net zomin als exergie. Daarbij werd nog een nieuw hoofdstuk geschreven over kleppen en afsluiters.

Dit boek werd geschreven met het oog op een zo breed mogelijk publiek. Dit houdt in dat het boek niet voorbijgaat aan de mathematische studie, waarbij enkele eenvoudige differentiatie en integratie aan bod komen, maar zeker geen differentiaal operatoren. Op deze wijze zou het boek voor iedereen moeten toegankelijk zijn, wat niet wil zeggen dat het voor iedereen eenvoudig is. Dit vrij uitgebreid werk waar duizenden uren aan werden besteed is encyclopedisch. Dat houdt in dat voor educatieve doeleinden in scholen de docent/lector een aantal onderwerpen, of delen ervan, zal moeten selecteren en een aantal zal moeten weglaten. Het betekent ook dat op universiteiten het wiskundige ten volle kan worden gedoceerd, terwijl bij studenten van 16 jaar daarvan abstractie moet gemaakt worden en slechts de basis dient te worden gegeven. Maar men moet beseffen dat Pompen en Compressoren, tezamen met Thermodynamica volgens mij, en ik heb 45 vakken gegeven in mijn carrière, ik weet dus waarover ik spreek, de belangrijkste vakken zijn voor technici allerhande.

Gezien het feit dat dit boek in vele scholen en hogescholen als referentie wordt gebruikt is het duidelijk dat dit boek een leemte in de technisch-wetenschappelijke literatuur in de Nederlandse taal opvult.

Nieuw is ook dat ik bij elk belangrijk Nederlandstalig woord tussen haakjes, in cursief, de Engelse term heb vermeld. Alle brochures zijn toch in het Engels.

Wat de symbolen betreft gebruik ik tevens zoveel mogelijk de symboliek die men aantreft in technische publicaties. Ondanks pogingen hiertoe is het vrijwel onmogelijk om hier een consensus te vinden zodat overal dezelfde notaties worden gebruikt. En dit is een probleem voor studenten, ik herinner mij mijn studies waarbij iedere prof andere notaties gebruikte; omdat ik als prof alle vakken van de Thermodynamica en Toegepaste Thermodynamica gaf ben ik daar inderdaad wel in geslaagd. Ik doceerde dan ook buiten basis Thermodynamica en Oefeningen onderwerpen zoals Pompen en Compressoren, Zuigermotoren en Turbines, Warmtetechnieken (Verbranding, Stookinrichtingen, Proceswarmte, Stoomketels), Warmtetransfer en Koeltechniek (Psychometrie, Koellasten en Compressiekoelmachines). Maar dat was een uitzonderlijke situatie, gezien het feit dat onze Hogeschool zo weinig studenten bevatte. Nu, sinds 2010 werden we opgenomen in de Universiteit, wat het academische karakter van de studie van Industrieel Ingenieur alleen maar beklemtoont.

Wat de tekenconventie in de thermodynamica betreft gebruik ik de moderne manier van werken: alle energie die een systeem binnenkomt wordt positief genoteerd, zoals dat meestal in de toonaangevende Amerikaanse boeken gedaan wordt.

Opmerkingen allerhande, ook aanvraag voor docentmateriaal, zijn nog steeds welkom bij de uitgever of op mijn adres borremans.m@telenet.be

Dankwoord

Dit kleurrijke boek zou niet mogelijk zijn geweest zonder de bijdrage van enthousiaste bedrijven over de hele wereld. Ze lieten me toe om hun afbeeldingen te gebruiken. Ze zijn, in alfabetische volgorde:

Abaque (PSG Dover)	Feluwa	Pedrollo S.p.A
Aerzen	Flowserve	Pennvaly pump
Aessal	Flowstar	Pfeiffer
Agilent	Fluimac	Psg Dover
Alfa Laval	Fluiten	Ritz
Allied pumps	Fondria Augusta	Rodealla Pumps International
Almecco	Friotherm	Rolls Royce
Alup - Grassair	Fst	Rotojet
Allweiler	Gardner Denver	Rubrpumpe
Andritz	Gea	Schaeffer
Ateliers François	Geveke	Seepex
Atkibnson Equipment	Glynwed/Reinhütte pumpen	Sepco
Atlas Copco	Grasso	Scam-Torino
Autosol	Greenheck	Shamai
Axongroup	Grundfos	Siemens
BBA Pumps BV)	Gutmbh	Sihi-Sterling
Begeman	Hawe	SKF
Bitzer	Heilig groep	Speck Pumpe
Blackmer (PSG Dover)	HeliosWika	SPXFlow
Boge	Hus	Stork
Burkhardt	Hermetic pumps GmbH	Systemair
Börger	Hibon	Sulzer
Bornemann	Hidrostal	Teesting
Bosch-Rexroth GmbH	Hitachi	The Intelligent Engineer
Cameron Compressor Systems	Hoerlinger Valve	Twente Universiteit
Cat pumps	Howden	Valvesco
CBI fans	Hus (Verder)	Vega Grieshaber KG Schiltach
Clasal	Ingersoll Rand	Verderair
Compare	iLLmVARC	Vestald
Comso	ITT Gouldpumps	Viking Pump
Cmo-pompel	Johnson Pumps	Vs
Cork	JPL Compressor Systems	Warman
Cornellpump	Kaeser	Watts Water
CP Pumpen A.G.	Klima	Weir
Dab	Knf	Wemco
Daikin	Kobolt	Wika
Dawson Dowie	Koerting	Wmftg
Daurex	KSB SE & Co KGaA	Yildi
Dewekom Engineering	Leistritz	Zwick Armaturen GmbH
Diafram	Lewa	
Dicsflo	Lewtek	
Dura	LewVac	
Dutair	Leybold Vacuum	
Ebbm-Papst	Liquidine Sealing Solutions	
Egger	Megator	
Edwards Vacuum	Metrohydraulic	
Emmerich pumpenfabrik	Mouvex (PSG Dover)	
Emtivac	Mwi pumps	
Endress	NBC leek	
Ensival Moret (Sulzer)	Neptuno	
Engineering Toolox	NMF	
Eriks	Ossila (www.ossila.com)	
Esp Pumps	Parker Hannifin	
	PDC Machines	

1 Fluïdumstatica

- 1.1 Wat zijn fluïda? 1
- 1.2 Wet van Pascal, 3
- 1.3 De atmosferische druk, 4
- 1.4 Invloed van de zwaartekracht, 5
- 1.5 Persdruk, 6
- 1.6 Voorbeeld 1.1: Persdruk, 7
- 1.7 Voorbeeld 1.2: Hydraulische pers, 7
- 1.8 Voorbeeld 1.3: Zwaartekracht en persdruk, 8
- 1.9 Communicerende vaten, 9
 - Voorbeeld 1.4, 10
- 1.10 Drukhoogte, 10
- 1.11 Drukmetingen
 - 1.11.1 Vloeistofmanometers, 11
 - 1.11.2 Veermanometers, 13
 - 1.11.3 Elektronische druk meettoestellen, 14
- 1.12 Meting van de temperatuur, 16
- 1.13 Meting van de soortelijke massa, 17
- 1.14 Niveaumeter, 17
- 1.15 Oefeningen
 - Oefening 1.8, 18
 - Oefening, 1.9, 19
- 1.16 Referenties, 20
- 1.17 Coda, 20

2 Thermodynamica

- 2.1 Wiskundige grondslagen
 - 2.1.1 Partiële afgeleide, 21
 - Voorbeeld 2.1, 22
 - 2.1.2 Totale differentiaal, 21
 - 2.1.3. Scalair product, 20
- 2.2 Temperatuur, 22
- 2.3 Warmte, 23
- 2.4 Gesloten systemen, 24
- 2.5 Toestand, 24
- 2.6 Inwendige energie, 25
- 2.7 Eerste hoofdwet, 26
- 2.8 Compressiearbeid, 26
- 2.9 Enthalpie, 27
- 2.10 Soortelijke warmte bij constant volume
 - 2.10.1 Definitie, 28
 - 2.10.2 Soortelijke warmte bij vaste stoffen, 28
 - 2.10.3 Soortelijke warmte bij vloeistoffen, 29
- 2.11 Soortelijke warmte bij constante druk
 - 2.11.1 Definitie, 30
 - 2.11.2 Soortelijke warmte c_p bij vaste stoffen, 30
 - 2.11.3 Soortelijke warmte c_p bij vloeistoffen, 30
- 2.12 Verplaatsingsarbeid, 30
- 2.13 Technische arbeid, 30
- 2.14 Enthalpie en 1^{ste} hoofdwet, 32
- 2.15 Entropie, 33
- 2.16 Dampen, 34
- 2.17 Toestandsdiagrammen, 35
 - Voorbeeld 2.2, 42
- 2.18 Toestandstabellen, 43
 - Voorbeeld 2.3, 54

- Voorbeeld 2.4, 55
- 2.19 Freeware
 - 2.19.1 Coolpack, 55
 - 2.19.2 Danfoss Coolselector, 58
- 2.20 Lineaire en logaritmische interpolatie
 - 2.20.1 Lineaire interpolatie bij T_{sat} , 58
 - 2.20.2 Logaritmische interpolatie, 62
 - Voorbeeld 2.5, 66
 - Voorbeeld 2.6, 72
 - Voorbeeld 2.7, 75
 - 2.20.3 Lineaire extrapolatie, 78
 - Voorbeeld 2.8, 78
- 2.21 Wrijvingsarbeid, 78
 - Voorbeeld 2.9, 82
- 2.22 Referenties, 84
- 2.23 Coda, 85

3 Fluïdumdynamica

- 3.1 Algemeen
 - 3.1.1 Continuüm, 86
 - 3.1.2 Debiet, 86
 - 3.1.3 Ideale uniforme stroming, 87
 - 3.1.4 Stationaire stroming, 87
 - 3.1.5 Continuïteitsvergelijking, 88
 - Voorbeeld 3.1, 88
 - Voorbeeld 3.2, 88
 - 3.1.6 Stroomlijnen, 89
- 3.2 De no-slip voorwaarde, 89
- 3.3 De vortexstroming, 89
- 3.4 Ideale fluïda
 - 3.4.1 Radiale stroming, 90
 - 3.4.2 Circulaire stroming
 - Gedwongen vortexstroming, 91
 - Vrije vortexstroming, 91
 - 3.4.3 Gemengde stromingen, 92
- 3.5 Circulatie, 93
- 3.6 Lokale wervelrotatie, 95
- 3.7 Vorticititeit
 - 3.7.1 Cartesische coördinaten, 96
 - Voorbeeld 3.3, 97
 - 3.7.2 Poolcoördinaten, 97
 - Voorbeelden 3.4, 99
- 3.8 Rotationale en irrationele stroming, 99
- 3.9 Wet van Bernoulli.
 - 3.9.1 Langs een stroomlijn, 101
 - 3.9.2 Formule van Euler, 103
 - 3.9.3 Wet van Bernoulli irrationele stroming, 103
 - 3.9.4 Tegenvoorbeeld, 105
 - 3.9.5 Lading, 107
 - 3.9.6 Statische, dynamische en stagnatiedruk, 107
 - 3.9.7 Bewegende assenstelsels, 108
- 3.10 Viscositeit
 - 3.10.1 Het verschijnsel viscositeit, 108
 - 3.10.2 Niet-Newtoniaanse vloeistoffen, 115
 - 3.11 Reële viskeuze stromingen
 - 3.11.1 Laminair versus turbulent, 115
 - 3.11.2 Snelheidsprofielen
 - Laminair, 118
 - Turbulent, 119
- 3.12 Correcties op Bernoulli

- 3.12.1 Stroming met wrijving, 120
- 3.12.2 Laminaire stroming, 121
- 3.13 Externe stroming
 - 3.13.1 Rond vlakke horizontale plaat, 122
 - 3.13.2 Afhaking, 123
 - 3.13.3 Rond cilinder of verticale plaat, 124
 - 3.13.4 Draaiende cilinder, 125
 - 3.13.5 Wervelstraat van Von Karman, 126
- 3.14 Interne stroming, 129
- 3.15 Draagvleugels
 - 3.15.1 Profiel, 130
 - 3.15.2 Toepassingen, 132
- 3.16 Software, 133
- 3.17 Formule van Kutta-Joukowski, 135
- 3.18 Debietmeter,
 - 3.18.1 Differentiaal debietmeters
 - Snelheidsmeting, 136
 - Pitotbuis meter, 136
 - Differentiaal debietmeter
 - Venturi-principe, 137
 - Principe met spuitstuk, 138
 - Debietmeter met meetflens, 139
 - Debietmeter met wig, 140
 - De kegeldebietmeter, 141
 - 3.18.2 Rotameter, 141
 - 3.18.3 Turbinemeter, 142
 - 3.18.4 Ultrasoon meter,
 - Transittijd methode, 143
 - Dopplereffect methode, 145
 - 3.18.5 Elektromagnetische debietmeter, 145
 - 3.18.6 Vortexmeter, 146
- 3.19 Viscosimeters
 - 3.19.1 Rotationale viscosimeter, 147
 - 3.19.2 Saybolt-meter, 148
- 3.20 Voorbeelden
 - Voorbeeld 3.4, 148
 - Voorbeeld 3.5, 149
- 3.21 Referenties, 150

4 Regelkleppen en afsluiters

- 4.1 Onderdelen klep of afsluiter, 152
- 4.2 Kogelafsluiter, 152
- 4.3 V-kogelkleppen, 153
- 4.4 Vlinderklep, 154
- 4.5 Schuifafsluiter, 155
- 4.6 Klepafsluiter, 155
- 4.7 Naaldafsluiter, 155
- 4.8 Balgafsluiter, 155
- 4.9 Membraanklep, 156
- 4.10 Plugafsluiter, 156
- 4.11 Knijpklep, 156
- 4.12 Terugslagklep, 157
- 4.13 Ontlastklep en veiligheidsklep, 157
- 4.14 Hoekklep, 159
- 4.15 Driewegklep, 159
- 4.16 Voetklep, 159
- 4.17 Drukreduceerkerklep, 160
- 4.18 Regelkleppen, 161
- 4.19 Klepinstallatie, 162
- 4.20 De K_v -waarde, 163
 - Voorbeeld 4.1, 164
- 4.21 De C_v -factor, 165
- 4.22 Waterslag, 165
- 4.23 Cavitatie, 166

- 4.24 Referenties, 169
- 4.25 Coda, 169

5 Hydraulische weerstanden

- 5.1 Formule van Darcy-Weissbach, 170
- 5.2 Laminair
 - 5.2.1 Rechte leiding, 171
 - 5.2.2 Hydraulische diameter, 172
 - 5.2.3 Plaatselijke weerstanden, 173
- 5.3 Weerstand bij turbulente stroming
 - 5.3.1 Algemeen, 173
 - 5.3.2 Ruwheid van pijpleidingen, 174
 - 5.3.3 Hydraulisch gladde leidingen, 174
 - 5.3.4 Hydraulisch ruwe leidingen, 175
 - 5.3.5 Overgangsgebied, 176
 - 5.3.6 Verouderingsfactor, 176
- 5.4 Diagram van Moody
 - 5.4.1 Eerste diagram, 176
 - 5.4.2 Tweede diagram, 178
 - Voorbeeld 5.1, 178
 - 5.4.3 Gekend verlies, 180
 - Voorbeeld 5.2, 180
- 5.5 Plaatselijke weerstanden
 - 5.5.1 Algemeen, 181
 - 5.5.2 Vena Contracta, 181
 - 5.5.3 Experimentele gegevens, 183
 - Voorbeeld 5.3, 188
 - Voorbeeld 5.4, 189
- Equivalentente lengte, 191
- 5.6 De C_w -factor, 192
 - Voorbeeld 5.5, 192
- 5.7 Lading, 194
- 5.8 Leidingstelsels, 194
 - Voorbeeld 5.6, 195
 - Voorbeeld 5.7, 198
- 5.9 Hydraulisch vermogen, 205
 - Voorbeeld 5.8, 205
- 5.10 Referenties, 205
- 5.11 Coda, 206

6 Pompeigenschappen

- 6.1 Opvoerdruk
 - 6.1.1 Geodetische opvoerdruk, 207
 - 6.1.2 Statische opvoerdruk, 208
 - 6.1.3 Manometrische opvoerdruk, 209
 - 6.1.4 Theoretische opvoerdruk, 209
- 6.2 3de uitbreiding wet van Bernoulli, 209
- 6.3 Vermogen, 210
 - Voorbeeld 6.1, 210
- 6.4 NPSH, 213
 - Voorbeeld 6.2, 215
- Voorbeeld 6.3, 215
- 6.5 Referenties, 216
- 6.6 Coda, 216

7 Oscillerende zuigerpompen

- 7.1 Werking, 217
- 7.2 Indicatoriagram, 218
- 7.3 Debiet, 218
- 7.4 Kleppen, 219
- 7.5 Afdichting, 220
- 7.6 Plunjerpompen, 221
- 7.7 Handpomp, 223

- 7.8 Jaknikker, 223
- 7.9 Dubbelwerkende zuigerpomp, 225
- 7.10 Vleugelpomp, 226
- 7.11 Debietregeling
 - 7.11.1 Start-stop regeling, 228
 - 7.11.2 Aantal cilinders, 228
 - 7.11.3 Overstroom regeling, 228
 - 7.11.4 Openhouden zuigklep, 228
 - 7.11.5 Ster-driehoek schakeling, 228
 - 7.11.6 Frequentieomvormer, 228
- 7.12 Membraanpompen
 - 7.12.1 Algemeen, 229
 - 7.12.2 Pneumatische aandrijving, 230
 - Werking pneumatisch ventiel, 231
 - 7.12.3 Elektrische aandrijving, 232
 - 7.12.4 Excentrische/mechanische aandrijving, 233
 - Voorbeeld 7.2, 233
 - 7.12.5 Hydraulische aandrijving, 234
 - 7.12.6 Dubbele schijf-pompen, 234
- 7.13 Pulsatiedempers, 237
- 7.14 Doseerpompen, 239
 - Diafragma doseerpomp, 239
 - Solenoïde doseerpomp, 240
 - Voorbeeld regeling dosering, 241
 - Inspuitpomp, 242
 - Meervoudige inspuitpompen, 242
- 7.15 Duplexpompen, 243
- 7.16 Triplexpompen, 244
- 7.17 Glijdende poort pomp, 247
- 7.18 Hydrofoorinstallatie, 249
- 7.19 Radiale plunjerpompen, 250
- 7.20 Axiale plunjerpompen, 251
- 7.21 Maximale zuighoogte
 - 7.21.1 Theoretisch, 253
 - 7.21.2 Dampspanning, 254
 - 7.21.3 Snelheid, 254
 - 7.21.4 Barometerstand, 255
 - 7.21.5 Wrijving, 255
 - 7.21.6 Versnelling
 - Kinematica, 255
 - Dynamica, 256
- 7.22 Luchtdrukketels
 - Zuigzijde, 259
 - Perszijde, 260
- 7.23 Manometrische opvoerdruk, 260
- 7.24 Theoretische opvoerdruk, 261
- 7.25 Vermogen en rendement, 261
 - Voorbeeld 7.1, 262
- 7.26 Karakteristieken
 - Karakteristiek van het systeem, 264
- Karakteristiek van de pomp, 265
- 7.27 Debietregeling, 265
- 7.28 NPSH, 265
- 7.29 Ontlastklep, 265
- 7.30 Besluiten, 265
- 7.31 Referenties, 266

8 Pompen met roterende zuiger

- 8.1 Lobbenpomp, 267
- 8.2 Tandwielpompen
 - 8.2.1 Uitwendige vertanding, 272
 - 8.2.2 Inwendige vertanding, 274
 - 8.2.3 Gerotorpomp, 276

- 8.2.4 Drukregeling verdringerpompen, 276
 - 8.2.5 Voorbeeld, 277
- 8.3 Peristaltische pomp, 277
- 8.4 Schottenpomp, 279
- 8.5 Wormpompen, 280
- 8.6 Monopomp, 283
- 8.7 Flexwaaierpomp, 287
- 8.8 Excentrische rotor pomp, 288
- 8.9 Sinuspomp, 289
- 8.10 Wateringpomp, 292
- 8.11 Overzicht, 294
- 8.12 Referenties, 294
- 8.13 Coda 294

9 Radiale turbopompen

- 9.1 Werking, 295
- 9.2 Waaivormen, 296
 - 9.2.1 Gesloten waaier, 297
 - 9.2.2 Halfopen waaier, 297
 - 9.2.3 Open waaier, 298
- 9.3 Snelheidsdriehoeken, 298
- 9.4 Debiet
 - 9.4.1 Definitie, 299
 - 9.4.2 Debietsbepalende component, 300
 - 9.4.3 Het relatieve debiet, 300
 - 9.5 Statische drukstijging in gesloten pomp, 301
- 9.6 Theoretische opvoerdruk, 303
 - 9.6.1 Bernoulli in roterend stelsel, 303
 - 9.6.2 Bespreking, 303
 - 9.6.3 Theoretische opvoerdruk, 304
 - Voorbeeld 9.1, 305
 - Voorbeeld 9.2, 306
- 9.7 Diffusor, 308
- 9.8 Soorten slakkenhuis, 310
 - 9.8.1 Algemeen, 310
 - 9.8.2 Tong recirculatie in slakkenhuis, 311
 - 9.8.3 Enkelvoudig en dubbelvoudig slakkenhuis, 311
- 9.9 Druk en snelheidsverloop, 312
- 9.10 Invloed van de schoepvorm
 - 9.10.1 Grafisch, 313
 - 9.10.2 Analytisch, 314
 - 9.10.3 Bespreking, 314
- 9.11 Correctie op de theoretische druk, 315
- 9.12 Verliezen
 - 9.12.1 Wrijvingsverliezen, 316
 - 9.12.2 Stootverliezen, 317
 - Voorbeeld 9.3, 317
 - 9.12.3 Stroming-recirculatie, 317
 - 9.12.4 Roterend stall-verschijnsel, 318
- 9.13 Werkelijke pompkarakteristiek, 319
- 9.14 Pompvermogen, 319
 - Schijfverliezen, 319
 - Volumetrische verliezen, 319
 - Mechanische verliezen, 320
 - Vermogen van de pomp, 320
- 9.15 Pomprenndement, 321
- 9.16 Werkpunt, 321
- 9.17 Invloed toerental, 321
 - Voorbeeld 9.5, 321
- 9.18 Cavitatie, 324
- 9.19 NPSH, 325
 - 9.19.1 Het begrip NPSH, 325

- 9.19.2 API versus DIN, 326
- 9.19.3 Bepaling van de NPSH, 327
- 9.19.4 Cavitatiefasen, 328
- 9.20 NPSH karakteristieken en NPSH, 329
- 9.21 Tegengaan van cavitatie, 330
 - Voorbeeld 9.6, 331
- 9.22 Stabiliteit, 333
- 9.23 Axiaalkracht, 334
- 9.24 Dubbelzijdige instroming, 334
- 9.25 Pompage (surge), 335
- 9.26 Vertakte persleiding, 336
- 9.27 Debietregeling
 - Smoorregeling, 337
 - Voorbeeld 9.7; 337
 - Bypassregeling, 341
 - Toerentalregeling, 341
 - Vergelijking, 341
- 9.28 Werkkarakteristiek centrifugaalpomp, 342
- 9.29 1ste set van gelijkvormigheidswetten, 343
 - Voorbeeld 9.8, 344
- 9.30 2^{de} set van gelijkvormigheidswetten, 346
 - Voorbeeld 9.9, 347
- 9.31 Toepassingsveld, 348
 - Voorbeeld 9.10, 350
- 9.32 Opstarten van de pomp, 350
- 9.33 Boosterpomp, 352
- 9.34 Mantelkoeling, 353
- 9.35 Hogedrukpompen, 354
- 9.36 Serieschakeling, 356
- 9.37 Parallelschakeling, 357
 - 9.37.1 Eenvoudig geval, 357
 - 9.37.2 Geval met stuk stijgende karakteristiek, 358
- 9.38 Dompelpomp, 359
- 9.39 Elektropompen, 360
- 9.40 Verontreinigde vloeistoffen, 361
- 9.41 Versnijderpompen, 362
- 9.42 Slurry pompen, 363
- 9.43 Lucht en centrifugaalpompen, 367
- 9.44 Opstellingen: Engelse terminologie, 368
 - 9.44.1 API-norm, 368
 - 9.44.2 Wijze van splitsing, 369
 - 9.44.3 Wijze van koppeling, 370
 - 9.44.4 Overhung pumps, 371
 - 9.44.5 Between bearings, 374
 - 9.44.6 Vertically suspended, 375
 - 9.44.7 Nog enkele termen, 377
- 9.45 Referenties, 377
- 9.46 Coda, 377

10 Axiale turbopompen

- 10.1 Werking, 378
- 10.2 Soorten vlakken en richtingen, 380
- 10.3 Debiet
 - 10.3.1 De doorstroomsnelheid v , 380
 - 10.3.2 Het doorstroomoppervlak A' , 381
- 10.4 Het aerodynamisch profiel, 381
- 10.5 Theoretische opvoerdruk, 383
 - 10.5.1 Eerste poging, 383
 - 10.5.2 De centrifugaalkracht, 385
 - Voorbeeld 10.1, 387
 - 10.5.3 Pompkarakteristiek met centrifugaalkracht, 387
 - 10.5.4 Vrije vortex in relatief kanaal, 390

- 10.5.5 Recirculatie en roterende stall, 390
- 10.6 Diffusor, 392
- 10.7 Schoepprofiel, 392
- 10.8 Besluit, 393
- 10.9 Halfaxiale pompen, 395
 - 10.9.1 Motivatie, 395
 - 10.9.2 Helicoïdaalpomp (Francis type), 395
 - 10.9.3 Diagonaalpomp, 396
- 10.10 Varianten, 398
- 10.11 Regeling
 - 10.11.1 Klassieke regelingen, 399
 - 10.11.2 Variabele aanvalshoek, 399
 - 10.11.3 Variabele schoephoek, 401
 - 10.11.4 Variabele diffusorschoepen, 402
- 10.12 Meertraps axiale turbopompen, 402
- 10.13 Cavitatie, 403
- 10.14 Archimedesschroef, 403
- 10.15 Besluiten, 404
- 10.16 Referenties, 404

11 Specifiek toerental

- 11.1 1^{ste} kengetal van Rateau, 407
- 11.2 2^{de} kengetal van Rateau, 407
- 11.3 Homologe serie pompen, 408
 - Optimale serie pompen, 409
 - Rateau kengetallen bij turbopompen, 410
- 11.4 Het specifieke toerental, 410
- 11.5 Parabolen van constante N_s , 413
- 11.6 Invloed viscositeit, 414
- 11.7 Zuigspecifieke snelheid, 416
- 11.8 Inducers, 417
- 11.9 Dubbel gekromde waaiers, 418
- 11.10 Coda, 419

12 Speciale Turbinepompen

- 12.1 Zijkanaalpomp, 420
- 12.2 Perifere pomp, 423
- 12.3 Pitotbuis pomp, 425
- 12.4 Vortexpompen, 426
- 12.5 Schijvenpomp, 428
- 12.6 Overzicht, 429
- 12.7 Coda, 429

13 Pompen met drijfmiddel

- 13.1 Algemeen, 430
- 13.2 Vloeistofstraal vloeistofpompen, 431
- 13.3 Vloeistofstraal vaste stof-pomp, 432
- 13.4 Toepassing: vloeistofstraalmengers, 433
- 13.5 Stoomstraal vloeistofpompen, 433
- 13.6 De feedbackpomp, 434
- 13.7 Luchtdrukpomp, 434
- 13.8 Coda, 435

14 Hermetische pompen

- 14.1 Magnetische koppeling, 435
- 14.2 Buspomp, 440

15 Gasdynamica

- 15.1 Stoichiometrie, 444
- 15.2 Perfecte gassen, 447
- 15.3 Soortelijke warmte perfect gas, 448

- 15.4 Betrekking van Mayer, 449
 - 15.5 Isentropische exponent perfect gas, 450
 - 15.6 Het ideaal gas; 451
 - 15.6.1 Temperatuur, 451
 - 15.6.2 De ideale gaswet, 451
 - 15.6.3 Soortelijke warmte ideaal gas, 451
 - 15.6.4 Isentropische exponent ideaal gas, 456
 - 15.7 Reële gassen, 456
 - 15.8 Mengsels van ideale gassen, 457
 - Voorbeeld 15.1, 457
 - 15.8.1 Partiële druk, 457,
 - 15.8.2 Equivalente molaire massa, 458
 - 15.8.3 Partiële volumes, 459
 - 15.8.4 Massa- en volumesamenstelling, 459
 - 15.8.5 Bepaling van de partiële druk, 460
 - 15.8.6 Verband massa- en volume-aandelen, 460
 - Voorbeeld 15.2 Lucht, 461
 - Voorbeeld 15.3 Aardgas, 461
 - Voorbeeld 15.4 Rookgassen, 461
 - 15.9 Standaardomstandigheden, 462
 - Voorbeeld 5.5: 462
 - 15.10 Luchtvermaat, 463
 - 15.11 Waterdauwpunt, 464
 - Voorbeeld 15.6, 464
 - Voorbeeld 15.7, 466
 - 15.12 Psychrometrie, 469
 - 15.12.1 Vochtige lucht, 469
 - 15.12.2 Waterinhoud, 469
 - 15.12.3 Verzadigde en onverzadigde lucht, 469
 - 15.12.4 Relatie tussen x en p , 470
 - 15.13 Definitie van een compressor, 470
 - Terminologie, 470
 - Symbool, 470
 - Normaalvolume, 471
 - 15.14 Toestandsveranderingen, 471
 - 15.14.1 Isotherme toestandsverandering, 471
 - 15.14.2 Isochore toestandsverandering, 473
 - 15.14.3 Isobare toestandsverandering, 474
 - 15.14.4 Adiabatische toestandsverandering, 475
 - 15.14.5 Polytropische toestandsverandering
 - Motivatie, 479
 - Toestandsvergelijking, 479
 - Specifieke compressie-arbeid, 479
 - Specifieke hoeveelheid warmte, 480
 - Specifieke technische arbeid, 481
 - Uitbreiding, 481
 - 15.15 Debiet, 482
 - 15.16 Technische vermogen, 483
 - Voorbeeld 15.8, 483
 - 15.17 Straalpijpen, 484
 - 15.17.1 Berekening eindsnelheid, 484
 - 15.17.2 Berekening van het massadebiet, 485
 - 15.17.3 De debietsfunctie ψ , 486
 - 15.17.4 De kritische druk, 486
 - 15.17.5 Kritische temperatuur, 487
 - 15.17.6 Kritisch soortelijk volume, 487
 - 15.17.7 Kritische snelheid, 488
 - Voorbeeld 15.9, 499
 - 15.18 Bespreking
 - 15.18.1 Opstellen der vergelijkingen, 490
 - 15.18.2 De straalbuis, 491
 - 15.18.3 Diffusor, 492
 - 15.19 Gedrag bij veranderlijke tegendruk
 - 15.19.1 Convergerende straalpijp, 493
 - 15.19.2 Convergent-divergente straalbuis, 494
 - Voorbeeld 15.10, 497
 - 15.20 Massadebietmeters, 498
 - 15.21 Referentielijst, 500
 - 15.22 Coda, 500
- ## 16 Warmte en koude
- 16.1 Warmtewisselaars, 501 16.2 Rendement, 503
 - 16.3 Condensors, 504
 - 16.4 Verdampers, 505
 - 16.5 Warmtestroom, 506
 - 16.5.1 Algemeen, 506
 - 16.5.2 Mengwarmtewisselaars, 506
 - 16.5.3. Oppervlaktewarmtewisselaars, 507
 - Voorbeeld 16.1, 507
 - 16.6 Koelmachines, 508
 - 16.6.1 Principe, 508
 - 16.6.2 Werkelijke kringloop, 511
 - 16.7 Chillers, 511
 - 16.8 Koeltorens, 512
 - 16.9 Koelvinnen, 514
 - 16.10 Warmtepompen, 514
 - 16.11 Referenties, 515
 - 16.12 Coda, 516
- ## 17 Oscillerende zuigercompressoren
- 17.1 Indicatoriagram, 517
 - 17.2 Componenten mechanisme, 517
 - 17.3 Cilinders, 518
 - 17.4 Afdichting, 519
 - 17.5 Kleppen, 521
 - 17.6 Volumetrisch rendement, 524
 - 17.7 Membraancompressor, 526
 - 17.8 Technische arbeid, 529
 - 17.9 Isotherme compressie, 536
 - 17.10 Polytropische compressie, 537
 - 17.11 Specifieke arbeid, 537
 - Voorbeeld 17.1, 558
 - 17.12 Compressie, verplaatsings- en technische arbeid, 540
 - 17.13 Koeling, 540
 - 17.14 Isothermisch rendement, 541
 - 17.15 Tweetrapscompressor, 542
 - 17.15.1 Motivatie, 542
 - 17.15.2 Algemeen, 543
 - 17.15.3 Indicatoriagram, 544
 - 17.15.4 Tussendruk, 544
 - 17.15.5 Arbeid per trap, 545
 - 17.15.6 Compressietemperatuur, 545
 - 17.15.7 Volumetrisch rendement, 545
 - 17.15.8 Cilinderafmetingen, 546
 - 17.15.9 Opstelling, 547
 - 17.16 Drie- en meertrapscompressoren, 547
 - 17.17 Problemen met watercondensatie, 548
 - 17.18 Debietregeling, 549
 - 17.18.1 Toerental, 549
 - 17.18.2 Smoring aanzuigleiding, 549

- 17.18.3 Openhouden zuigklep, 550
- 17.18.4 Dode ruimte, 552
- 17.18.5 Andere regelingen, 552
- 17.19 Zuiger koelcompressor, 553
- 17.20 Besluiten, 554

18 Roterende zuigercompressoren

- 18.1 Rootscompressor
 - 18.1.1 Werking, 555
 - 18.1.2 Technische arbeid, 555
 - 18.1.3 Eigenschappen, 556
- 18.2 Schottencompressor
 - 18.2.1 Werking, 558
 - 18.2.2 Ontwerp- en persdruk, 559
 - 18.2.3 Eigenschappen, 560
 - 18.2.4 Regeling, 561
 - 18.2.5 Toepassingen koeltechniek, 561
- 18.3 Schroefcompressor
 - 18.3.1 Werking, 561
 - 18.3.2 Eigenschappen, 564
 - 18.3.3 Regeling, 565
 - 18.3.4 Koelcompressor, 567
- 18.4 Mono schroefcompressor
 - 18.4.1 Werking, 569
 - 18.4.2 Eigenschappen, 570
 - 18.4.3 Regeling, 570
- 18.5 Scrollcompressor, 571
- 18.6 Tandrotorcompressor, 573
- 18.7 Rollende zuiger, 574
- 18.8 Waterring compressor
 - 18.8.1 Werking, 575
 - 18.8.2 Eigenschappen, 576
- 18.9 Debietregeling roterende verdringercompressoren, 577
- 18.10 Referenties, 577

19 Radiale ventilatoren

- 19.1 Algemeen, 578
- 19.2 Statische en dynamische druk, 579
- 19.3 Schoeptypes, 581
- 19.4 Gedrag van verschillende waaivormen, 583
- 19.5 Uitvoeringsvormen, 583
- 19.6 Voorbeelden, 584
- 19.7 Case Study
 - 19.7.1 Algemeen, 585
 - 19.7.2 Selectie van een ventilator, 587

20 Axiale ventilatoren

- 20.1 Algemeen, 592
- 20.2 Soorten axiale ventilatoren
 - Kanaalventilator, 593
 - Axiale ventilator met diffusor, 594
 - Propeller ventilator, 595
- 20.3 Diagonale ventilator, 596
- 20.4 Tweetrapsuitvoering, 597
- 20.5 Reactiegraad, 598
- 20.6 Contraroterende axiaalventilatoren, 600
- 20.7 Variabele spoed, 601
- 20.8 Voorbeeld: turbofan, 604
- 20.9 Voorbeelden, 604
- 20.10 Referenties, 606

21 Speciale turboventilatoren

- 21.1 Kruisventilatoren, 607
- 21.2 Zijkanaalventilatoren, 608

22 Radiale turbocompressoren

- 22.1 Turbo-centrifugaalradiator, 610
- 22.2 Case Study, 611
- 22.3 Isentropisch rendement, 613
- 22.4 Adiabaat met wrijving, 615
 - Voorbeeld 22.1, 616
- 22.5 Toepassingen, 617
 - Voorbeeld 22.2, 617
- 22.6 Dimensie-analyse, 619
 - Voorbeeld 22.3, 621
- 22.7 Meertraps: algemeen, 623
- 22.8 Tussenkoeling, 626
- 22.9 Compressor met tandwieloverbrenging, 627
 - Voorbeeld 22.4, 629
- 22.10 Toepassingen, 630
- 22.11 Olie, 631
- 22.12 Pompgrens (surge), 631
- 22.13 Anti-surge-maatregelen, 633
- 22.14 Choke, 633
- 22.15 Besluiten, 634
- 22.16. Debietregeling
 - Toerental, 634
 - Smoring, 634
 - Variabele inlaat-leischoepen, 635
 - Variabele diffusorschoepen, 636
- 22.17 Polytropisch rendement
 - 22.17.1 Definitie polytropisch rendement, 636
 - 22.17.2 Berekening polytropisch rendement, 637
 - 22.17.3 Vergelijking isentropisch-polytropisch rendement, 638
 - Voorbeeld 22.5, 641
- 22.18 Koelcompressoren, 641
- 22.19 Overzicht toepassingsveld koelcompressoren, 646

23 Axiale turbocompressoren

- 23.1 Algemeen, 647
- 23.2 Voorbeeld 648
- 23.3 Hybride turbocompressor, 650
- 23.4 Regeling, 651
- 23.5 Axiaal versus radiaalcompressor, 651
- 23.6 Werkgebied turbocompressor, 652
- 23.7 Referenties turbocompressoren, 652

24 Injectors

- 24.1 Stoomstraal compressor
 - 24.1.1 Algemeen, 654
 - 24.1.2 Injector met mengwarmtewisselaar, 656
 - 24.1.3 Injector met 3 oppervlaktewarmtewisselaars, 657
- 24.2 Gasinjectors, 657
- 24.3 Toepassingen, 659
- 24.4 Koeltechniek, 660
- 24.5 Referenties, 660

25 Vacuümpompen

- 25.1 Kinetische gastheorie, 661
- 25.2 Formatietijd, 662
- 25.3 Vacuüm-meetapparatuur
 - 25.3.1 Inleiding, 662
 - 25.3.2 Bourdon-meetapparatuur, 662
 - 25.3.3 Pirani-meetapparatuur, 663
 - 25.3.4 Thermokoppels, 663
 - 25.3.5 Capacitieve membraanmeter, 664
 - 25.3.6 Kathodemeters, 664
- 25.4 Stromingstypes, 665
- 25.5 Grof vacuüm
 - 25.5.1 Membraanpompen, 666
 - 25.5.2 Stoomstraalpijp-vacuümpomp, 666
 - 25.5.3 Vloeistofejector-vacuümpomp, 670
 - 25.5.4 Gasstraal -vacuümpomp, 670
 - 25.5.5 Centrifugaal vacuümpomp, 671
 - 25.5.6 Vloeistofring-vacuümpomp, 671
- 25.6 Fijn vacuüm
 - 25.6.1 Schottenpomp, 672
 - 25.6.2 Gasballast, 674
 - 25.6.3 Worm- en schroefvacuümpompen, 675
 - 25.6.4 Scroll-vacuümpomp, 675
 - 25.6.5 Rollende zuiger, 676
 - 25.6.6 Rootsvacuümpomp, 677
 - 25.6.7 Klauw-vacuümpomp, 678
- 25.7 Hoog vacuüm
 - 25.7.1 Diffusiepompen, 681
 - 25.7.2 Diffusie-ejectorpompen, 682
 - 25.7.3 Turbomoleculaire pompen, 683
- 25.8 Ultrahoog vacuüm
 - 25.8.1 Sorptiepompen, 684
 - 25.8.2 Adsorptiepomp, 684
 - 25.8.3 Sublimatiepomp, 685
 - 25.8.4 Ion-getter-pomp, 686
- 25.9 Overzicht werkgebied vacuümpompen, 687
- 25.10 Referenties, 688

Gebruikte symbolen

Eenheden

De *dimensies* in dit boek zijn de *SI-dimensies*, Lengte (L), massa (m), tijd (t), Stroom (Ampère), hoek (radialen, rad), Temperatuur (Kelvin, K)

De *eenheden* die we gebruiken worden weergegeven in onderstaande tabel: Eenheden worden in dit boek, te uwen gerieve, steeds tussen vierkante haakjes [] geplaatst. Sommige eenheden zijn eerder technisch en niet conform de SI-normen, maar wel zeer veel gebruikt in de praktijk. Zo bijvoorbeeld de [bar], in feite zou men alleen maar eenheden mogen gebruiken die een duizendvoudige macht zijn van een basiseenheid, hier de Pascal, dus men zou de MPa moeten gebruiken, wat in hypermoderne boeken al gebeurt. Maar in de technische brochures gebruikt men steeds de bar, en ja, wat moet ik dan doen, als bijna niemand de MPa gebruikt?

afstand	meter	m
massa	kilogram	kg
	kilomol	kmol
tijd	Seconde	s
	Minuut	min
	Uur	u
kracht	Newton	N
koppel, moment	Newton Meter	Nm
arbeid	Joule	J
vermogen	Watt	W
absolute temperatuur	Kelvin	K
relatieve temperatuur		°C
omwentelingen	Omw per sec	tps
	Aantal rotaties per minuut	rpm
druk	Pascal	P
hoek	Radialen	rad
	Zestigdelige graden	°

Variabelen

Symbl	Betekenis	Eenheid
a	Versnelling	[m/s ²]
a_{max}	Maximum versnelling	[m/s ²]
a^*	Versnelling in zuigleiding	[m/s ²]
A	Oppervlakte	[m ²]
AFR	Air to Fuel ratio	–
A'	Loodrecht oppervlak, of dwarsoppervlak zuigleiding	[m ²]
A^*	Dwarsoppervlakte zuigleiding	[m ²]
A_L	Doorloop oppervlakte lekkkanaal	[m ²]
b	Diepte (waaier)	[m]
\mathcal{B}	Magnetisch inductieveld	[W/m ²]
c	(Absolute) snelheid r	[m/s]
c_θ	Tangentiële component	[m/s]
c_{1r}	Snelheid aan zuigflens	[m/s]
c_r	Radiale component snelheid	[m/s]
\bar{c}	Gemiddelde snelheid	[m/s]
c_∞	Snelheid op oneindig	[m/s]
c_r	Radiale component van c	[m/s]
c_θ	Polaire θ –component van c	[m/s]
c_p	Soortelijke warmte bij constante druk	[J/kg, K]
\bar{c}_p	Gemiddelde soortelijke warmte bij constante druk	[m/s]
c_{ref}	Referentiesnelheid	[m/s]

c_v	Gemiddelde soortelijke warmte bij constant volume	[J/kg, K]
\bar{c}_v	Gemiddelde soortelijke	[J/kg, K]
c_x	x-component snelheid	[m/s]
c_y	y-component snelheid	[m/s]
c_∞	Snelheid op oneindig	[m/s]
c_{gr}	Snelheid in grenslaag	[m/s]
c_{buiik}	Snelheid op buik profiel	[m/s]
c_r	Radiale component snelheid	[m/s]
\bar{c}	Gemiddelde snelheid	[m/s]
c_r	Radiale component van c	[m/s]
c_θ	Polaire θ –component van c	[m/s]
c_p	Soortelijke warmte bij	[J/kg, K]
c_v	Soortelijke warmte bij	[J/kg, K]
c_x	x-component snelheid	[m/s]
c_y	y-component snelheid	[m/s]
c_g	Gemiddelde snelheid	[m/s]
c_{kr}	Kritische snelheid	[m/s]
c_∞	Snelheid op oneindig	[m/s]
c_{gr}	Snelheid in grenslaag	[m/s]
c_L	Vloeistofsnelheid in lekkkanaal	[m/s]
c_{rug}	Snelheid op rug profiel	[m/s]
c^*	Geluidsnelheid	[m/s]
C_x	Sleepcoëfficiënt	–
C_z	Liftcoëfficiënt	–

C_w	Verliesfactor	$[m^5 \cdot s^2]$
C_V	C_V – factor	US-maten
CoP	Corfficient of Prestation	–
d	Differentiaal	–
D	Diameter	[m]
\mathcal{D}	Sleepkracht	[N]
D_H	Hydraulische diameter	[m]
e^-	Elektron	–
\bar{e}_θ	Eenheidsvector	–
\bar{e}_x	Eenheidsvector	–
\bar{e}_y	Eenheidsvector	–
E_k	Kinetische energie	[J]
f	Frequentie	$[s^{-1}]$ -
f_V	Doorlaatpercentage	–
F	Kracht	[N]
F_c	Centrifugaalkracht	[N]
F_s	Stuwkracht Archimedes	[N]
G	Gewicht	[N]
GFR	Gas to Air ratio	–
g	Versnelling gravitatieveld	$[m/s^2]$
h_z	Statische zuighoogte	[m]
h_p	Statische pershoogte	[m]
h	Specifieke enthalpie	[J/kg]
h_{sat}^l	Specifieke enthalpie verzadigde vloeistof	[J/kg]
h_{sat}^g	Specifieke enthalpie verzadigd	[J/kg]
\mathcal{H}	Totale enthalpie	[J]
\mathcal{H}_{sat}^l	Totale enthalpie verzadigde vloeistof	[J]
\mathcal{H}_{sat}^g	Totale enthalpie verzadigd gas	[J]
H	Hoogte, drukhoogte	[m]
H_{th}	Theoretische opvoerhoogte	[m]
H_z	Geodetische zuighoogte	[m]
$H_{th,0}$	Theoretische opvoerhoogte bij nuldebiet	[m]
$H_{z,max}$	Maximale aanzuighoogte	[m]
H_p	Geodetische pershoogte	[m]
H_{geo}	Geodetische opvoerhoogte	[m]
H_W	Wrijvingshoogte,	[m]
H'	Aflezing schuingeplaatste vloeistofmanometer	[m]
k	Abs ruwheid	[m]
K	Constante totale druk	[Pa]
K_V	K_V – factor	$[3600 \cdot kg^{1/2} \cdot m^{-5/2}]$
k	Relatieve ruwheid	[m]
K_{Vs}	K_V voor open klep	$[3600 \cdot kg^{1/2} \cdot m^{-5/2}]$
K_r	Kritisch punt	–
K, K_1, K_2	Constante	–
K	Constante totale druk Bernoulli	-
K_{sp}	Uitlaatcoëfficiënt bij spuitstuk, manometer	–

K_{dia}	Uitlaatcoëfficiënt bij diafragma-manometer	–
K_{wig}	Uitlaatcoëfficiënt bij wig-manometer	–
ℓ_1	Afgelegde afstand tijdens zuigslag	[m]
ℓ_2	Afgelegde afstand tijdens persslag	[m]
\mathbb{L}	Lus	–
L	Lengte	[m]
L'	Fictieve aanzuiglengte	[m]
\mathcal{L}	Liftkracht	[N]
L_{eq}	Equivalentente lengte	[m]
L_H	Aanlooplegte	[m]
m	Massa	[kg]
m^*	Verplaatste massa	[kg]
m^*	Massa molecule	[kg]
m_{sat}^l	Massa verzadigde vloeistof	[kg]
m_{sat}^g	Massa verzadigd gas	[kg]
m_{dl}	Massa droge lucht	[kg]
m_w	Massa water in lucht	[kg]
m_{dl}	Massa droge lucht	[kg]
Δm	Hoeveelheid massa	[kg]
M	Molaire massa	[kg/kmol]
M_{dl}	Molaire massa droge lucht	[kg/kmol]
M_a	Getal van Mach	–
\bar{M}	Moment (koppel)	[N.m]
n	Polytropische exponent	–
n	Aantal kilomol	–
n^0	Neutron	[V]
N	Toerental	[tps, tpm]
N_A	Getal van Avogadro	–
N_s	Specifiek toerental	$[m^{3/4} \cdot s^{-3/2}]$
$NPSH_a$	Beschikbare NPSH	[m]
$NPSH_r$	Vereiste NPSH	[m]
$NPSH_3$	3% NPSH	[m]
N_{ss}	Zuig specifieke snelheid	$[m^{3/4} \cdot s^{-3/2}]$
N_ω	Dimensieloos specifiek toerental	-
N_{ref}	Referentie toerental karakteristiek turbocompressor	[tpm]
O_{cd}	Oppervlakte onder curve cd	[J]
O_{ab}	Oppervlakte onder curve ab	[J]
\bar{p}	Impulsvector	[kg.m/s]
p	Persklep	
p	Druk	[Pa]
p^+	Proton	–
$p_{p,z}$	Druk aan zuigflens	[Pa]
p'_d	Dampdruk aan zuigflens	[Pa]
p'	Statische druk in- of uitlaatleiding pomp	[Pa]
p_a	Atmosferische druk	[Pa]
p_{abs}	Absolute druk	[Pa]
p_d	Dampdruk (dampspanning)	[Pa]
p_{dyn}	Dynamische druk	[Pa]
p_{diff}	Verschildruk bij manometer	[Pa]
p_{dl}	Partiële druk droge lucht	[Pa]

p_{geo}	Geodetische druk	[Pa]
p_{eff}	Effectieve (relatieve) druk	[Pa]
p_{dp}	Dampdruk in persreservoir	[Pa]
p_{1r}	Statische druk aan zuigflens	[Pa]
p_{2r}	persflens	[Pa]
p_{dz}	Druk in zuigreservoir	[Pa]
$p_{v,pz}$	Drukverlies tijdens zuigslag	[Pa]
p_H	Hydraulisch verlies in pomp	[Pa]
$p_{v,pp}$	Drukverlies tijdens persslag	[Pa]
p_{vp}	= p_H Verlies druk door wrijving	[Pa]
$p_{k,p}$	Absolute druk in persketel	[Pa]
$p_{k,z}$	Absolute druk in zuigketel	[Pa]
p_{dt}	Stootverlies	[Pa]
$p_{k,z,g}$	Druk windketel zuigzijde	[Pa]
$p_{k,p,g}$	Druk windketel perszijde	[Pa]
p_{th}	Theoretische druk	[Pa]
$p_{th,0}$	Theoretische druk bij nuldebiet	[Pa]
$p_{th,g}$	Theoretische opvoerdruk bij gemiddelde straal	[Pa]
p_{kr}	Kritische druk	[Pa]
p_z	Druk in zuigreservoir	[Pa]
p_{man}	Manometrische opvoerdruk	[Pa]
p_p	Druk in persreservoir	[Pa]
p_s	Statische druk	[Pa]
p_{st}	stootverliesdruk	[Pa]
p_{tot}	Totale druk	[Pa]
$p_{tot,s}$	Totale druk aan zuigzijde	[Pa]
$p_{tot,1r}$	Totale opvoerdruk	[Pa]
p_{rug}	Statische druk op rug profiel	[Pa]
p_{bui}	Statische druk op buik profiel	[Pa]
p_W	Drukverlies door wrijving	[Pa]
p_{Wz}	Wrijvingsdruk in zuigleiding	[Pa]
p_{wp}	Wrijvingsdruk in persleiding	[Pa]
p_{sat}	Saturatiedruk	[Pa]
$p_{W,sat}$	Saturatiedruk water in lucht	[Pa]
p_W	Partiële druk water in lucht	[Pa]
p_{ref}	Referentiedruk karakteristiek turbocompressor	[Pa]
P	Pomp- of compressorvermogen	[W]
P_W	Wrijvingsvermogen	[W]
P_{as}	Asvermogen	[W]
P_W	wrijvingsvermogen	[W]
P_{th}	Technisch vermogen	[W]
P	= P_{as}	[W]
P_{geo}	Geodetisch vermogen	[W]
P_{sch}	Schijfvermogen	[W]
$P_{t,iso}$	Isothermisch vermogen compressor	[W]
$P_{t,pol}$	Polytropisch vermogen compressor	[W]
P_{hyd}	Hydraulisch vermogen	[W]

\mathcal{P}	Prestatiefactor warmtepomp	–
q_{ij}	Specifieke warmtehoeveelheid	[J/kg]
Q_M	Massadebiet	[kg/s]
$Q_{s,ij}$	Warmtestroom	[W]
Q_V	Volumetrische debiet	[m ³ /s]
$Q_{V,g}$	Gemiddeld volumetrische	[m ³ /s]
$Q_{V,th}$	Theoretisch volumedebiet	[m ³ /s]
$Q_{V,n}$	Nominaal volumetrische debiet	[m ³ /s]
δq	Elementaire hoeveelheid	[J/kg]
q_{ij}	Specifieke warmtehoeveelheid	[J/kg]
Q_{ij}	Totale hoeveelheid warmte	[J]
ΔQ	Warmtehoeveelheid	[J]
\mathfrak{R}	Reactiegraad	–
\mathcal{R}	Universele gasconstante	
r	Variabele straal	[m]
r_v	Gemiddelde straal	[m]
r_t	Straal aan top schoep	[m]
r_v	Straal aan voet schoep	[m]
r_m	Straal aan midden schoep	[m]
r_{sat}	Specifieke saturatiewarmte	[J/kg]
r_g	Gemiddelde straal (variabele)	[m]
R	Straal (vast)	[m]
r	Variabele straal	[m]
R	Universele gasconstante	[J/kg]
Re	Getal van Reynolds	–
Re_x	Getal van Reynolds op plaats x	–
Re_{kr}	Kritisch Reynolds getal	–
s	Verplaatsing	m
s	Specifieke entropie	[J/kg.K]
s_{sat}^l	Specifieke entropie verzadigde vloeistof	[J/kg.K]
s_{sat}^g	Specifieke entropie verzadigd gas	[J/kg.K]
S	Slaglengte	[m]
S	Pompsnelheid	[m ³ /s]
S	Assenstelsel	
\mathcal{S}	Totale entropie	[J/K]
Str	Getal van Strouhal	–
t	Tijd	Sec, min,
T	Temperatuur	[°C,K]
T_{tr}	Tripelpunt	[°C,K]
T_{kr}	Kritische temperatuur	[°C,K]
T_{sat}	Saturatietemperatuur	[°C,K]
T_{ref}	Referentietemperatuur karakteristiek turbocompressor	[°C,K]
Δt	Tijdsinterval	[s]
u	Variabele	
u	Omtreksnelheid waaier	[m/s]
u_g	Gemiddelde omtreksnelheid	[m/s]
u	Specifieke inwendige energie	[J/kg]
\mathcal{U}	Totale inwendige energie	[J]
v	Soortelijk (specifiek) volume	[m ³ /kg]
v_{kr}	Kritisch Soortelijk volume	[m ³ /kg]
v_{sat}^l	Soortelijk (specifiek) volume verzadigde vloeistof	[m ³ /kg]

v_{sat}^g	Soortelijk (specifiek) volume verzadigd gas	[m ³ /kg
v	Een variabele	-?
ν	Kinematische viscositeit	[m ² /s]
V	Volume	[m ³]
V^A	Volume lucht	[m ³]
V_{St}^A	Stoichiometrisch volume lucht	[m ³]
V_{sat}^l	Volume verzadigde vloeistof	[m ³]
V_{sat}^g	Volume verzadigd gas	[m ³]
V_0	Dood volume	[m ³]
V_s	Slagvolume	[m ³]
V_t	Toelaatvolume	[m ³]
V_i	Inlaatvolume verdringingscompressor	[m ³]
V_{II}	Uitlaatvolume verdringingscompressor	[m ³]
w	Een variabele	
w	Relatieve snelheid	[m/s]
δw	Elementaire specifieke arbeid	[J/kg]
w_{ij}	Specifieke mechanische arbeid	[J/kg]
$w_{c,ij}$	Specifieke compressiearbeid	[J/kg]
$w_{v,ij}$	Specifieke verplaatsingsarbeid	[J/kg]
$w_{t,ij}$	Specifieke technische arbeid	[J/kg]
$w_{d,ij}$	Specifieke drukveranderingsarbeid	[J/kg]
$w_{w,ij}$	Specifieke wrijvingsarbeid	[J/kg]
$w_{t,iso}$	Isothermische specifieke arbeid compressor	[J/kg]
$w_{t,pol}$	Polytropische specifieke arbeid compressor	[J/kg]
$W_{v,ij}$	Totale wrijvingsarbeid	[J]
W	Totale mechanische arbeid	[J]
W_{ij}	Totale mechanische arbeid	[J]
$W_{c,ij}$	Totale compressie-arbeid	[J]
$W_{t,ij}$	Totale technische arbeid	[J]
ΔW	Hoeveelheid arbeid	[J]
x	Abscis	[m]
x_i	Massaprocent partieel gas	-
X	Dampgehalte	-
\mathcal{X}	Correctie wet van Bernoulli	-
y	Ordinaat	[m]
y_i	Volume% partieel gas	-
Z	Aantal schoepen	-
z	Hoogte in gravitatieveld	[m]
z_{st}	Zuighoogte volgens DIN	[m]
z_{ref}	Referentiehoogte	[m]

Griekse Symbolen

α	Absolute hoek	[° of rad]
α^*	Contractiefactro	-
β	Relatieve hoek	[° of rad]
γ	Isentropische exponent	-
δ^*	Dikte laminaire grenslaag,	[m]
δ^*	Relatieve dichtheid	-
δ	Dichtheid= soortelijke massa	[kg/m ³]
ε	relatieve ruwheid, coëfficiënt dode ruimte	-
ε_{ind}	inductiespanning	[V]

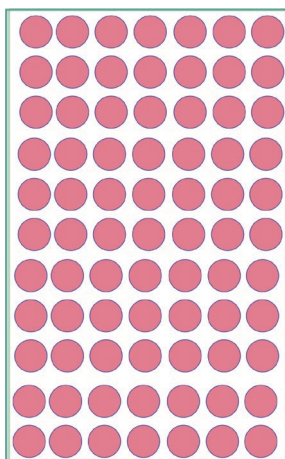
γ	Isentropische exponent	-
ρ	Soortelijke (specifieke) massa	[kg/m ³]
τ	Schuifspanning	[Pa]
χ	Correctiefactor laminaire stroming Bernoulli	-
Δ	Verschil, toename	-
Δh	Geodetische hoogteverschil	[m]
ΔQ	Hoeveelheid warmte	[J]
λ	Hydraulische weerstand, verliescoëfficiënt	-
λ	Gemiddelde vrije weglengte (vacuüm) H25	[m]
λ	Volumetrisch rendement zuigercompressor	-
λ	Luchtvermaat	-
ν	Axiale snelheid	[m/s]
ν	Kinematische viscositeit	[m ² /s]
μ	Dynamische viscositeit	[Pa.s]
φ (iets)	Functie van iets	-
ϕ	Evenredigheidscoëfficiënt	-
ϕ_B	Magnetische flux	[Wb]
ω	Hoeksnelheid, globale circulatiesnelheid	[rad/s]
Σ	Som	-
Ω	Lokale wervel rotatie	[s ⁻¹]
τ	schuifspanning	
Γ	Circulatie	
\Re	Reactiegraad	-
Θ	Hoek	[rad]
Π	Product	
Π_i	Kengetal	
Π_1	1ste getal van Rateau	-
Π_2	2de getal van Rateau	[m ² /s ²]
ψ	Debietsfunctie	-
ψ_{max}	Maximum van de debietsfunctie	-
σ	Thoma parameter	-
η	Rendement	-
η_H	Hydraulisch rendement	-
η_i	Rendement installatie	-
η_s	Isentropisch rendement	-
η_c	Rendement compressor	-
η_{iso}	Isothermisch rendement	-
η_p	Rendement pomp	-
η_{pol}	Polytropisch rendement	-
η_m	Mechanisch rendement	-
η_V	Volumetrisch rendement	-
$\eta_{\Delta o}$	Drukwinst druklading	-
$\eta_{s,ref}$	Referentie isentropisch rendement karakteristiek turbocompressor	-
o	(omicron) Verband tussen ζ_{lam} en ζ_{turb}	-
ζ_c	Correctiefactor niet-cirkelvormige doorsnede	-
ζ	Hydraulische weerstandsfactor	-
ζ_c	Correctiefactor plaatselijke weerstand laminaire stroming	-
ζ_v	Vorticiteit	[m ² /s]
ζ_{lam}	Verliesfactor laminaire stroming	-
ζ_{turb}	Verliesfactor turbulente stroming	-

Hoofdstuk 1 Fluidumstatica

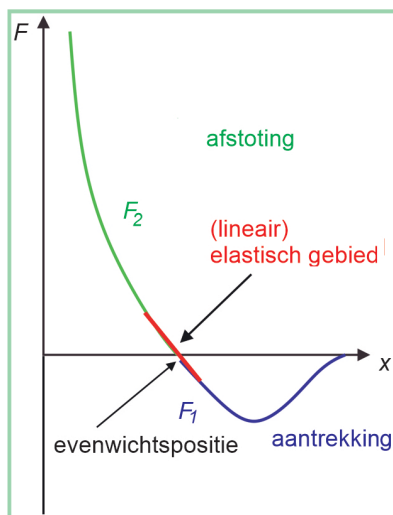
1.1 Wat zijn fluïda

Een stof kan zich bevinden in verschillende toestanden. Een eerste toestand is deze van de vaste stof (*solid*). Hierbij bestaat de stof uit atomen of moleculen die allen zeer sterk met elkaar verbonden zijn door atoomkrachten.

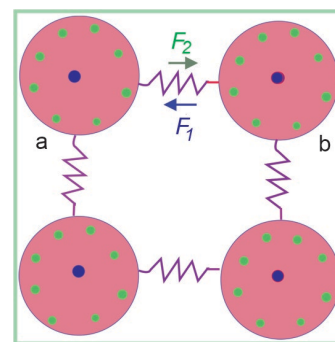
De atomen kunnen zich op allerlei verschillende manieren rangschikken. De bekendste is deze van het kristalrooster waarbij zij zich in een regelmatig rooster schikken (Figuur 1.1). Maar vaste stoffen komen ook in andere vormen voor: amorphe stoffen (zoals glas, zijn doorzichtig), polymeren, composietmaterialen...



Figuur 1.1: Vaste stof



Figuur 1.2: Kernkracht en elektrische kracht



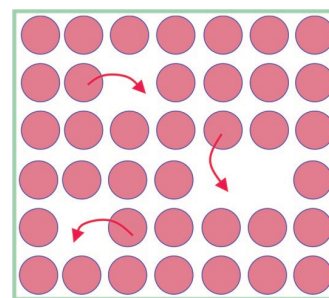
Figuur 1.3: Veermodel

Atomen bestaan uit een kern met *protonen* (*protons*), dat zijn positief geladen deeltjes, en *neutronen* (*neutrons*), neutrale deeltjes. De kernen (blauw bolletje, a) oefenen op korte afstand een aantrekkende kernkracht F_1 (Figuur 1.2, 1.3) uit op hun omgeving (b). In Figuur 1.2 wordt het verloop van deze kracht getekend in functie van de onderlinge afstand x der atomen. De *elektronen* (*electrons*) van een atoom (*atom*) oefenen een afstotende elektrische kracht F_2 uit op de elektronen (groene bolletjes) van hun buuratomen. Daar waar de netto kracht F nul is bevindt het atoom zich in een evenwichtspositie, bij een afstand van ongeveer $4 \cdot 10^{-8}$ [cm]. Nabij dit punt gedraagt de functie F zich quasilineair en kan men het gebeuren modelleren als zijnde een veer in rust. Dit gebied wordt het *elastische gebied* (*elastic area*) genoemd, naar het woord “elastiek”.

Bij een temperatuur van 0 [K] neemt de stof de minste plaats in. Neemt de temperatuur toe dan beginnen de atomen te trillen rond hun evenwichtspositie. De *temperatuur* (*temperature*) van een stof is een maat voor de gemiddelde translatie bewegingsenergie (kinetische energie) van de atomen. Toegevoerde energie verhoogt de energie van *translatie*, *rotatie*, *vibratie* (*translation*, *rotation*, *vibration*) en andere vormen van beweging die bij complexe moleculen voorkomen. Neemt de temperatuur T van de vaste stof toe door warmtetoever dan beginnen de atomen (moleculen) te trillen. De stof zet uit: het volume V [m^3] van de stof neemt toe, de veer zet uit.

De waarde van de trilling is een statistisch verschijnsel. Sommige atomen trillen heviger dan andere. Een atomaire trilling kan zodanig sterk zijn dat er op een zeker ogenblik vacatures beginnen te ontstaan omdat hier en daar een trilling zo hevig is dat ze zich kan onttrekken aan de aantrekkende kernkracht. Atomen kunnen zich verplaatsen naar die vacatures. (Figuur 1.4). Een stof “leeft”.

Ook de statische druk p (*static pressure*) boven de stof speelt een rol. Deze druk kunnen we ons inbeelden als ‘hoe sterk duwen de atomen of moleculen op elkaar’. Hoe hoger de druk hoe kleiner het volume van de vaste stof zal zijn, maar de voornaamste rol is toch die van de temperatuur. Wanneer de temperatuur stijgt neemt het volume van de stof meer en meer toe en dat laat toe dat kleine groepjes van atomen een beetje hun eigen leven gaan leiden (Figuur 1.5).



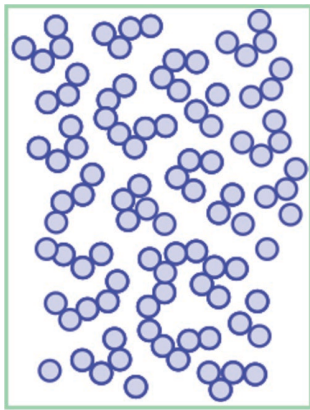
Figuur 1.4: Vacatures ontstaan.

Er komen relatief grotere ruimtes beschikbaar. De vaste stof begint vloeibaar te worden. Een vloeibare stof “loopt” en heeft dus een container nodig om deze bijeen te houden. Een vloeistof wordt gekenmerkt door moleculaire chaos en het ontbreken van orde op grote afstand.

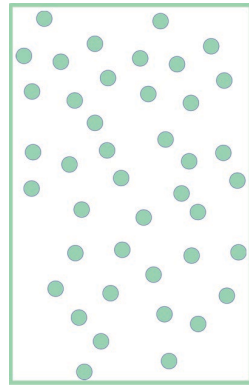
Neemt de temperatuur verder toe of neemt de druk boven de vloeistof af dan kunnen alle vloeistofdeeltjes ontsnappen aan de aantrekkingskracht tussen atomen of moleculen, cohesiekracht genoemd en zullen atomen zich

volledig vrij verplaatsen in het vat waarin zij zich in bevinden. Dat gebeurt vanaf een welbepaalde druk en temperatuur, karakteristiek voor de soort stof.

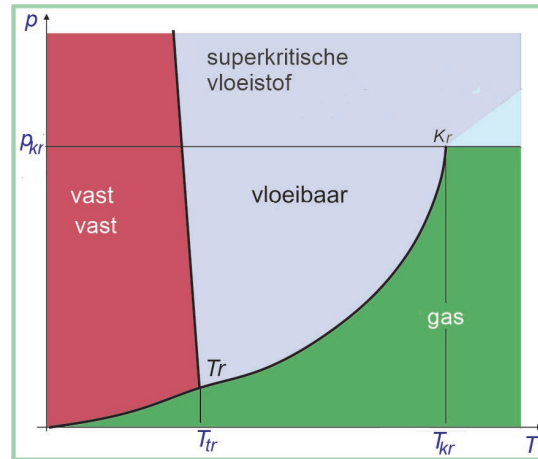
De vrije deeltjes vormen een gas (Figuur 1.6).



Figuur 1.5: Vloeistof.



Figuur 1.6: Gas



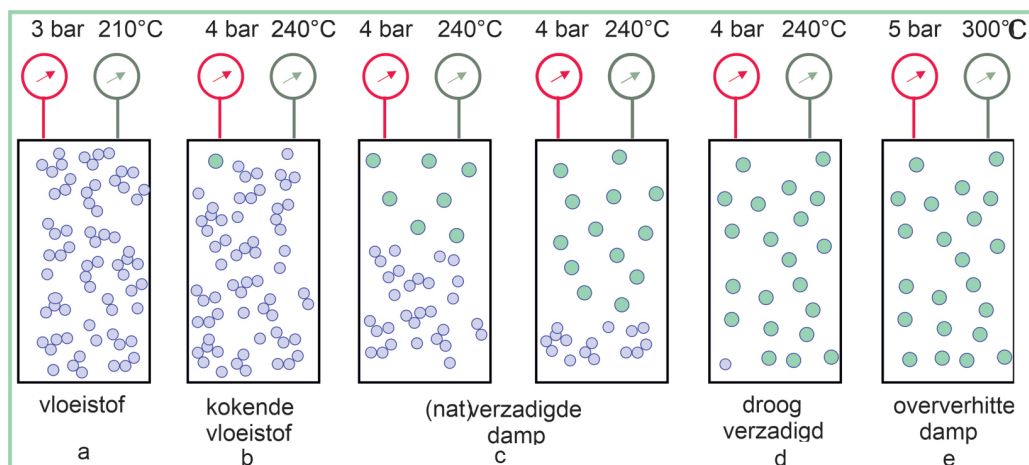
Figuur 1.7: Fasendiagram

Druk en temperatuur waarbij dit gebeurt zijn niet onafhankelijk van elkaar op dit ogenblik, bij iedere temperatuur, *verzadigingstemperatuur* (*saturation temperature*) genoemd, hoort een welbepaalde statische druk, *verzadigingsdruk* genoemd, dewelke men in grafieken of tabellen kan voorstellen (Figuur 1.7). De zwarte lijnen in de Figuur stellen de zogenaamde *verzadigingslijnen* voor. In plaats van het woord *verzadiging* gebruikt men ook wel eens het woord *satueratie*. Deze lijnen verdelen het vlak in drie zogenaamde *fases*, de vaste fase, de vloeibare fase en de gasfase. Het punt K_r is het *kritisch punt*. Boven de kritische druk is er geen onderscheid meer tussen de vloeistof- en de gasfase. Waar de drie verzadigingslijnen samenkomen bevindt zich het *tripelpunt* T_r . Voor water bedraagt de statische druk bij het kritisch punt 221 [bar] en de temperatuur 374 [°C]. Het tripelpunt van water bevindt zich bij 612 [Pa] en 0,01 [°C].

De overgang van vast naar vloeibaar of van vloeibaar naar gas gaat geleidelijk, naarmate de warmtetoevoer. In beide gevallen is het een gebeuren waarbij de twee betrokken stoftoestanden cohabiteren. In Figuur 1.8 wordt het gebeuren bij een *verzadigde damp* (*saturated vapour*) voorgesteld in opeenvolgende figuren.

Dit gebeuren heet de *verzadigingstoestand*. Beschouwen we nu enkel de overgang van vloeibaar naar gas.

In dat geval gaat het om een *verzadigde* vloeistof. Helemaal in het begin van de warmtetoevoer zal een eerste vloeistofdeeltje gasvormig worden (Figuur 1.8b). Deze toestand heten we *kokende vloeistof*. Daarna, naarmate meer en meer warmte wordt toegevoerd, zullen meer en meer vloeistofdeeltjes zich vrijmaken, zij worden gasvormig (c). Het geheel is een *natte damp*. De druk en temperatuur blijven constant zoals bij de kokende vloeistof. De warmte die toegevoerd wordt dient niet om de temperatuur van de stof te verhogen, maar is zogenaamde *latente warmte* (*latent heat*), de warmte die nodig is om de atomen uiteen te rukken. Warmtetoevoer die dient om enkel de temperatuur te doen stijgen heet *voelbare warmte* (*sensible heat*).



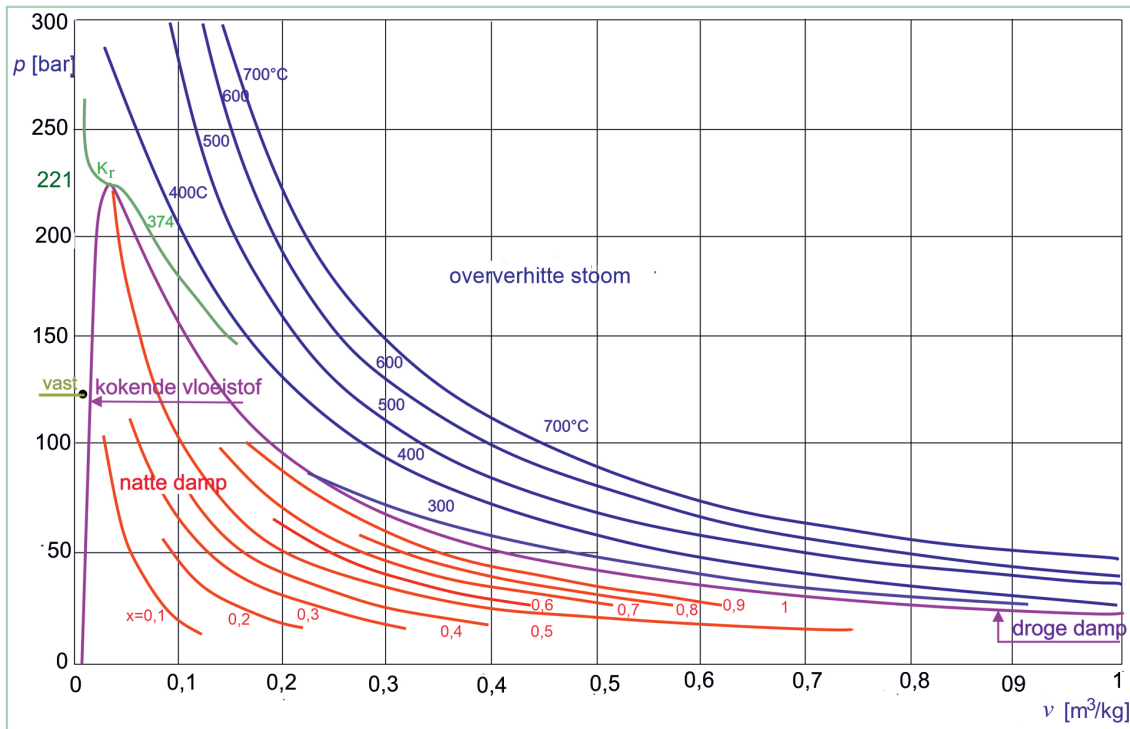
Figuur 1.8: Van vloeistof naar oververhitte damp (gas)

Indien we zo verder gaan komen we op het ogenblik dat de laatste vloeistofdruppel zich naar de gastoestand zal begeven. Deze toestand heten we *droog verzadigde damp* (Figuur 1.8d), (*dry saturated vapour*). Bij verdere warmtetoevoer komen we tot de gastoestand, ook wel *oververhitte damp* (*superheated vapour*) genoemd (Figuur 1.8e). Alle atomen bewegen nu onafhankelijk van elkaar, er is geen aantrekkingskracht meer tussen hen. De temperatuur neemt alsmaar toe, maar men kan eventueel ook de druk doen dalen om hetzelfde effect te bereiken.

Het *dampgehalte* X in het gebied van de *natte damp* wordt gedefinieerd als de verhouding van de hoeveelheid massa gas m_{gas} ten opzichte van de totale massa m . De gebruikelijke notatie bij ingenieurs is meestal gewoon x ,

maar om het onderscheid te maken met de coördinaat-notatie x gebruiken we hier een grote x : X . Voor *kokende vloeistof* is $X = 0$. Bij $X = 1$ betreft het *droog verzadigde damp*, en voor *natte damp* geldt: $0 \leq X \leq 1$

In het diagram in Figuur 1.9 wordt een *thermodynamisch diagram* van water weergegeven, met op de ordinaat de statische druk p [Pa] van het water, op de abscis het soortelijke volume v [m³/kg] van het water. Men kan de verschillende fasen onderscheiden. Het punt K_r is het *kritische punt* (*critical point*) - bij water, afhankelijk van de bron, ongeveer: 374 [°C], 221 [bar] - waar de drie fasen samenkomen.



Figuur 1.9: Thermodynamisch pv -diagram van water.

Het gebied van de vaste stof maakt geen deel uit van dit boek, maar de studie ervan gebeurt in vakdomeinen zoals de mechanica, de sterkteleer en de materialenkennis. In dit boek bestuderen we enkel *fluida*, dat zijn alle stoffen die we vernoemd hebben uitgezonderd de puur vaste stoffen.

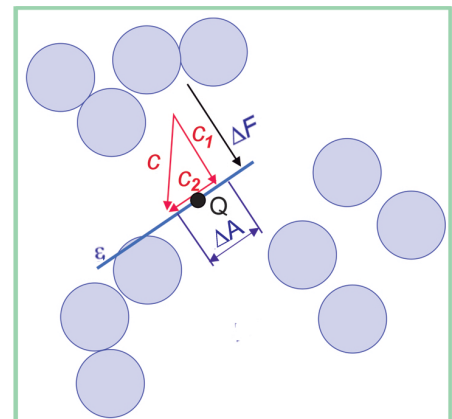
Tot hertoe hebben we het over zuivere stoffen, dit zijn stoffen die uit maar één soort atoom of molecule bestaan. Maar er bestaan ook *mengsels* (*mixture*). Van belang voor pompen zijn bijvoorbeeld vloeistofmengsels, of vloeistoffen met vaste deeltjes, zgn. *gecontamineerde* vloeistoffen (*contaminated liquid*), of slurry, water met modder bijvoorbeeld, of vloeistoffen met ingesloten gassen, vaak lucht. Bij compressoren gaat het om gassen, zuivere zoals ammoniak (NH₃), methaan (CH₄), maar ook over lucht, dat een mengsel is van voornamelijk zuurstof en stikstof.

1.2 De wet van Pascal

Beschouwen we een vat waarin zich een fluidum bevindt in rust. De druk tussen de deeltjes en op de wand heten we de *hydrostatische* druk, vaak laten we het woord *Hydro* weg.

Pascal beweerde (hij is gestorven) dat de statische druk in een vat overal gelijk is in elke richting en loodrecht staat op de wanden van het vat. Hier geven we eigenlijk een vectorieel karakter aan de druk, wat niet juist is, maar we doelen daarbij op de kracht die deze druk veroorzaakt.

De *hydrostatica* of fluidumstatica is de wetenschap die zich bezighoudt met fluida in rust.



Figuur 1.10: Wet van Pascal

Wij geven hier in dit boek enkel de dingen weer die van belang zijn voor de verdere studie, begrippen zoals drukkrachten op gebogen oppervlakken zoals stuwdammen, de wet van Archimedes en de stabiliteit van drijvende voorwerpen kan u uitgebreid bestuderen in de vele boeken in de referentielijst.

We spreken hier wel over het begrip druk, maar het werd nog niet duidelijk gedefinieerd. Hier gaan we. We bestuderen de kracht ΔF [N] op een oppervlak ε loodrecht op het blad en een punt Q. Op dat oppervlak ε nemen we een klein stukje oppervlak ΔA [m²]. De atomen of moleculen bewegen steeds en botsen met mekaar met een gemiddelde snelheid c ; de langscomponente (langs ε) hiervan speelt geen rol, ze glijdt langs het oppervlak ε , dit

geeft dan aanleiding tot een kleine kracht ΔF loodrecht op een oppervlak ΔA . De gemiddelde druk $p_{gem,Q,\varepsilon}$ in een punt Q langs oppervlak ε op een klein stukje oppervlak ΔA bedraagt deze statische druk:

$$p_{gem,Q,\varepsilon} = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Voor een infinitesimaal klein oppervlak ΔA nemen we de limiet:

$$p_{Q,\varepsilon} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Volgens Pascal is de lokale druk onafhankelijk van de richting, dus of we nu het oppervlak ε nemen of een andere, dat speelt geen rol, bijgevolg, indien we door ΔA^* het kleinste oppervlak voorstellen dat nog zin heeft om een gemiddelde over te nemen:

$$p_Q = \lim_{\Delta A \rightarrow \Delta A^*} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

1.3 De atmosferische druk

U realiseert het u misschien niet, maar op dit ogenblik bevindt er zich zowat 50 [km] gas, lucht (naar het schijnt met veel te veel CO_2) boven op uw hoofd. Dat geldt trouwens ook voor dieren. Maar dat gas wordt alsmaar dunner of ijler naarmate we boven het aardoppervlak stijgen.

Men heeft een standaard, beter gezegd een atmosferische druk op zeeniveau gedefinieerd, de *normale* atmosferische druk, gelijk aan 1,01325 [bar], vaak afgerond naar 1 [bar], bij 15° [C.] U dient zich wel te realiseren dat de atmosferische druk p_a in werkelijkheid verschillend kan zijn van deze normale druk, ze verandert zelfs van straat tot straat. Deze atmosferische druk kan gaan van zo'n 700 [mbar] tot 1080 [mbar] naargelang de plaats op de aarde (Tabel 1.1).

In de praktijk komen we drukken tegen die boven of onder de atmosferische druk op zeeniveau gelegen zijn. Een druk boven de atmosfeerdruk heet een *overdruk*, daaronder is het een *onderdruk*.

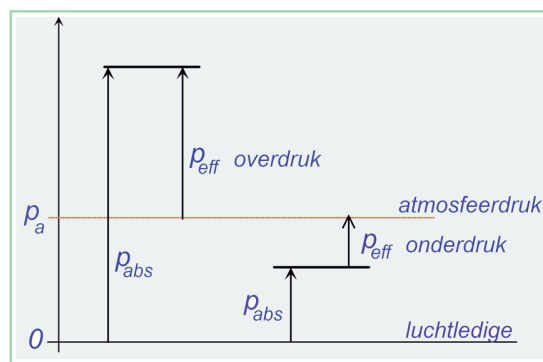
Natuurlijk is er niets aan gelegen te beschikken aan apparaten die zich bezighouden met atmosferische druk te produceren, zo zijn we niet. Daarom is het in de praktijk meer geschikt te spreken over een *effectieve druk*, dat is de druk gelegen boven of onder de atmosfeerdruk p_a , een klassieke statische druk heten we de *absolute druk*, maar het drukverschil tussen de atmosfeerdruk en de werkelijke absolute druk p_{abs} heten we dus de *effectieve*, of *relatieve druk*, p_{eff} . Dit kan een overdruk of onderdruk zijn:

$$p_{eff} = p_{abs} - p_a$$

Tabel 1.1: Normale atmosferische drukken

hoogte[m]	500	0	100	200	500	1000	2000	2500	3000
p_a [bar]	1.08	1.013	1.00129	0.98945	0.95460	0.89873	0.79492	0,747	0,701

Figuur 1.11 illustreert een en ander.



Figuur 1.11: Effectieve druk

We onderscheiden volgende druk meettoestellen:

- Een *manometer* meet in het algemeen een effectieve druk, dat is een *overdruk* (t.o.v. de atmosferische druk)
- Een *vacuümmeter* meet een *onderdruk* (t.o.v. de atmosferische druk)
- Een *barometer* meet de *absolute druk* van de atmosfeer

Qua eenheden wordt een duidelijke notatie aangehouden. Men noteert als volgt: [bar(g)], [bar_g] of [barg] voor effectieve druk ("g" staat voor *gauge* = ijk, meettoestel) en [bar(a)], [bar_a] of [bara] voor absolute druk.