

# Innhold

## Eksempler og oppgaver 9

## Termodynamikkens betydning 17

### Kapittel 1

#### Idealgass 20

- 1.1 Definisjoner og viktige ideer 22
- 1.2 Temperatur 22
- 1.3 Indre energi i en idealgass 23
- 1.4 Trykk 25
- 1.5 Tilstandslikningen for idealgass 27
- 1.6 Tilstandsendringer for spesielle prosesser 30
- 1.7 Isoterm minsking av trykket med høyden 33
- 1.8 Teknikk ved oppgaveløsning 34

#### Oppgaver 37

### Kapittel 2

#### Kinetisk gassteori og statistisk mekanikk 42

- 2.1 Diskrete fordelinger 44
- 2.2 Kontinuerlige fordelinger 45
- 2.3 Tilstandslikningen for idealgass fra kinetisk gassteori 46
- 2.4 Maxwells hastighetsfordeling 48
- 2.5 Boltzmannfordelingen 56
- 2.6 Partisjonsfunksjonen 59

#### Oppgaver 65

### Kapittel 3

#### Termodynamikkens 1. lov 70

- 3.1 Volumarbeid 72
- 3.2 Varme 76
- 3.3 Spesifikk varmekapasitet 78
  - 3.3.1 Spesifikk varmekapasitet for idealgass 79
- 3.4 Den adiabatisk tilstandslikningen 82
- 3.5 Arbeid ved adiabatisk volumendring av idealgass 86
- 3.6 Adiabatisk temperatur- og trykkvariasjon med høyden i atmosfæren 88
  - 3.6.1 Den adiabatisk temperaturgradienten 88
  - 3.6.2 Den adiabatisk minskingen av trykket med høyden 89

#### Oppgaver 93

**Kapittel 4      Varmekraftmaskiner og kjølemaskiner    100**

- 4.1    Virkningsgraden til en varmekraftmaskin    102
  - 4.2    Carnotmaskinen    104
  - 4.3    Mer realistisk beregning av virkningsgraden    109
  - 4.4    Varmepumper og kjølemaskiner    111
- Oppgaver    114

**Kapittel 5      Entropi og termodynamikkens 2. lov    124**

- 5.1    Entropi    126
  - 5.2    Entropiendring for idealgass med konstant  
        spesifikk varmekapasitet    127
  - 5.3    Termodynamikkens 2. lov    129
  - 5.4    Entropi, boltzmannfordeling og  
        termodynamikkens 2. lov    130
  - 5.5    Termodynamikkens 3. lov    133
  - 5.6    Entalpi, fri energi, gibbsenergi og kjemisk potensial    135
  - 5.7    Fra partisjonsfunksjon til entropi    138
  - 5.8    Termodynamiske funksjoner for idealgass    145
  - 5.9    En mer generell definisjon av temperatur    147
- Oppgaver    153

**Kapittel 6      Varmedledning    158**

- 6.1    Varmedledning gjennom en vegg    160
  - 6.2    Varmedledning gjennom vegg med flere lag    162
  - 6.3    Formfaktor    168
  - 6.4    Varmedovergang    169
  - 6.5    Tiden det tar å endre temperaturen til et legeme    174
- Oppgaver    176

**Kapittel 7      Stråling    182**

- 7.1    Strålingslovene    185
  - 7.2    Svartlegemestrålingens termodynamikk    186
  - 7.3    Drivhuseffekten    192
    - 7.3.1    Beregning av jordas overflatetemperatur    192
      - 7.3.1.1    Jordas strålingsbalanse uten drivhuseffekt    192
      - 7.3.1.2    Jordas strålingsbalanse med drivhuseffekt    194
  - 7.4    Hvordan jorda opprettholder lav entropi    197
  - 7.5    Hvor mye fri energi får jorda fra solstrålingen?    198
- Oppgaver    200

**Kapittel 8 Faseoverganger og fuktig luft 204**

- 8.1 Kondensasjon og fordampning 206
- 8.2 Gass med flere komponenter 209
- 8.3 Kvalitet 211
- 8.4 Fuktig luft 212
- 8.5 Clausius–Clapeyrons likning 220
  - 8.5.1 Kokepunkt 226
- 8.6 Van der Waals tilstandslikning 228
- Opgaver 230

**Kapittel 9 Termodynamikk for universet 236**

- 9.1 Universets ekspansjon 238
- 9.2 Adiabatisk ekspansjon av kosmisk støv, stråling og vakuumentergi 240
- Opgaver 244

**Tillegg Negativ absolutt temperatur 246**

- T.1 Absolutt temperatur 248
- T.2 Motivering av definisjonen av absolutt temperatur [4] 249
- T.3 Betingelse for at et system kan ha negativ temperatur 250
- T.4 Et system med to energinivåer 250
- T.5 Betydningen av «varm» og «kald» for systemer som kan ha negativ temperatur 252
- T.6 En ny temperaturskala? 254
- T.7 Termodynamikk for systemer med negativ temperatur 254
- T.8 Negativt trykk 256
- T.9 Konsekvenser for universet? 257
- Referanser 258
- Opgaver 258

**Løsningsforslag 259****Termodynamisk ordliste 323****Stikkord 332****Formler i termodynamikk 337**



# Eksempler og oppgaver

## Kapittel 1

<b>Eksempel 1.1</b>	Tilførsel av energi til luft ved pusting.....	25
<b>Eksempel 1.2</b>	Estimat av antall molekyler i atmosfæren.....	27
<b>Eksempel 1.3</b>	Isoterm ekspansjon .....	31
<b>Eksempel 1.4</b>	Beregning av trykket når to gasser blandes med hverandre .....	35
<b>Oppgave 1.1</b>	Manometer.....	37
<b>Oppgave 1.2</b>	Beregning av antall mol og volumet i en gass .....	37
<b>Oppgave 1.3</b>	Beregning av temperaturen til en gass .....	37
<b>Oppgave 1.4</b>	Beregning av molekylvekten til molekylene i en gass .....	38
<b>Oppgave 1.5</b>	Beregning av trykket i en gass .....	38
<b>Oppgave 1.6</b>	Trykkøkning i beholder som tilføres gass og varmes opp .....	38
<b>Oppgave 1.7</b>	Blanding av tre gasser.....	38
<b>Oppgave 1.8</b>	Tilstandsendringer av gass .....	38
<b>Oppgave 1.9</b>	Luft i bildekk.....	39
<b>Oppgave 1.10</b>	Termodynamikk for heliumballong.....	39
<b>Oppgave 1.11</b>	Dykkerklokke.....	40

## Kapittel 2

<b>Eksempel 2.1</b>	Sannsynlighet.....	45
<b>Eksempel 2.2</b>	Den gjennomsnittlige kinetiske energien til et molekyl.....	53
<b>Eksempel 2.3</b>	Antall kollisjoner mot en flate per enhetsareal og sekund .....	55
<b>Eksempel 2.4</b>	Partisjonsfunksjon og indre energi til gass av toatomige molekyler.....	62
<b>Oppgave 2.1</b>	Midlere molekylhastighet i en heliumballong .....	65
<b>Oppgave 2.2</b>	Bevegelsesenergien til molekylene i en gass.....	65
<b>Oppgave 2.3</b>	Molekylhastighet og molekylmasse .....	66

<b>Oppgave 2.4</b>	Trykk fra kinetisk gassteori .....	66
<b>Oppgave 2.5</b>	Sannsynlighetstettheten til en klassisk harmonisk oscillator .....	66
<b>Oppgave 2.6</b>	Gjennomsnittsenergi til boltzmannfordelte partikler.....	66
<b>Oppgave 2.7</b>	Gjennomsnittlig energi per partikkel for et system med to energinivåer .....	67
<b>Oppgave 2.8</b>	Den totale energien for et system med to energinivåer .....	67
<b>Oppgave 2.9</b>	Gjennomsnittsenergien til en kvantisert harmonisk oscillator...	67
<b>Oppgave 2.10</b>	Et system av harmoniske oscillatorer .....	67
<b>Oppgave 2.11</b>	Hydrogengass.....	68
<b>Kapittel 3</b>		
<b>Eksempel 3.1</b>	Vannkoker.....	78
<b>Eksempel 3.2</b>	Anvendelse av termodynamikkens 1. lov på en toatomig idealgass .....	82
<b>Eksempel 3.3</b>	Adiabatisk ekspansjon av idealgass.....	87
<b>Eksempel 3.4</b>	Idealgass i tyngdefelt.....	91
<b>Oppgave 3.1</b>	Oppvarming av vann ved hjelp av solpanel.....	93
<b>Oppgave 3.2</b>	Volumarbeid og varme ved ekspansjon av gass .....	93
<b>Oppgave 3.3</b>	Oppvarming av idealgass .....	93
<b>Oppgave 3.4</b>	Adiabatisk ekspansjon av idealgass.....	94
<b>Oppgave 3.5</b>	Temperaturstigning ved adiabatisk kompresjon av idealgass ....	94
<b>Oppgave 3.6</b>	Adiabatisk kompresjon av idealgass.....	94
<b>Oppgave 3.7</b>	Endring av indre energi ved avkjøling av en gass.....	94
<b>Oppgave 3.8</b>	Isobar ekspansjon.....	94
<b>Oppgave 3.9</b>	Indre energi og volumarbeid ved en syklisk prosess.....	95
<b>Oppgave 3.10</b>	Arbeid og varme ved en syklisk prosess .....	96
<b>Oppgave 3.11</b>	Arbeid ved adiabatisk ekspansjon .....	96
<b>Oppgave 3.12</b>	Arbeid ved adiabatisk kompresjon .....	97
<b>Oppgave 3.13</b>	Heving og oppvarming av vann .....	97

<b>Oppgave 3.14</b>	Tiden det tar å varme opp vann .....	98
<b>Oppgave 3.15</b>	Blanding av to gasser.....	98
<b>Oppgave 3.16</b>	Spesifikk varmekapasitet for et system med to energinivåer.....	98
<b>Oppgave 3.17</b>	Varmekapasitet og translasjonsenergi, rotasjonsenergi og vibrasjonsenergi.....	99

## Kapittel 4

<b>Eksempel 4.1</b>	Temperaturutjevning og carnotmaskin .....	106
<b>Eksempel 4.2</b>	Ottomaskinen .....	108
<b>Eksempel 4.3</b>	To varmepumper i serie.....	112
<b>Eksempel 4.4</b>	Fryseboks.....	113
<b>Oppgave 4.1</b>	Virkningsgrad for varmekraftmaskin 1 .....	114
<b>Oppgave 4.2</b>	Virkningsgrad for varmekraftmaskin 2 .....	114
<b>Oppgave 4.3</b>	Dieselmaskinen .....	115
<b>Oppgave 4.4</b>	Joule–Brayton-maskinen.....	115
<b>Oppgave 4.5</b>	Stirlingmaskinen.....	116
<b>Oppgave 4.6</b>	Ericsonmaskinen.....	117
<b>Oppgave 4.7</b>	Newcomenmaskinen.....	117
<b>Oppgave 4.8</b>	Lenoirmaskinen.....	118
<b>Oppgave 4.9</b>	Varmekraftmaskin 1 .....	118
<b>Oppgave 4.10</b>	Varmekraftmaskin 2.....	119
<b>Oppgave 4.11</b>	Varmekraftmaskin 3.....	120
<b>Oppgave 4.12</b>	Beregning av bensinforbruket til en bilmotor.....	121
<b>Oppgave 4.13</b>	Kjølemaskin og varmepumpe .....	122

## Kapittel 5

<b>Eksempel 5.1</b>	Entropiendring ved smelting av is.....	128
<b>Eksempel 5.2</b>	Entropiendring ved oppvarming av vann .....	128
<b>Eksempel 5.3</b>	Entropiøkning ved temperaturutjevning .....	129
<b>Eksempel 5.4</b>	Entropiendring til et system med to energinivåer .....	131
<b>Eksempel 5.5</b>	Entalpien til overopphetet vanndamp .....	136
<b>Eksempel 5.6</b>	Utledning av tilstandslikningen for idealgass fra partisjonsfunksjonen .....	139
<b>Eksempel 5.7</b>	Et system av kvantiserte harmoniske oscillatorer.....	139
<b>Eksempel 5.8</b>	Varmekapasitet for en gass av toatomige hydrogenmolekyler .....	142
<b>Eksempel 5.9</b>	Et spinnsystem i et magnetfelt .....	148
<b>Oppgave 5.1</b>	Entropiøkning for en ekspanderende gass.....	153
<b>Oppgave 5.2</b>	Entropiendring ved avkjøling av en kopp te.....	153
<b>Oppgave 5.3</b>	Entropiendring når en ballong sprekker .....	154
<b>Oppgave 5.4</b>	Entropiendring når et legeme kastes i havet og får vannets temperatur.....	154
<b>Oppgave 5.5</b>	Entropiøkning ved isokor oppvarming.....	154
<b>Oppgave 5.6</b>	Forskjell i entropi i gass og væskefase.....	154
<b>Oppgave 5.7</b>	Entropiendring i varmekraftmaskin.....	154
<b>Oppgave 5.8</b>	Carnotmaskin.....	155
<b>Oppgave 5.9</b>	Kjølemaskin.....	155
<b>Oppgave 5.10</b>	Entropiøkning ved oppvarming og ekspansjon av en gass .....	156
<b>Oppgave 5.11</b>	Entropiøkning ved ekspansjon av gass .....	156
<b>Oppgave 5.12</b>	Varmekapasitet for et spinnsystem i et magnetfelt.....	157
<b>Oppgave 5.12</b>	Boltzmannfordeling for et system med to energinivåer .....	157
<b>Oppgave 5.13</b>	System av kvanteoscillatorer .....	157
<b>Oppgave 5.14</b>	Termodynamikk for en kvanterotor .....	157



## Kapittel 6

<b>Eksempel 6.1</b>	Beregning av temperaturen i et grensesjikt .....	161
<b>Eksempel 6.2</b>	Temperaturfordelingen i en homogen vegg.....	161
<b>Eksempel 6.3</b>	Varmestrøm gjennom en trelagsvegg.....	164
<b>Eksempel 6.4</b>	Radiell varmestrøm ut av et sylindrisk rør .....	165
<b>Eksempel 6.5</b>	Radiell varmestrøm gjennom et kuleskall .....	167
<b>Eksempel 6.6</b>	Varmedledning gjennom tolagsvegg.....	172
<b>Eksempel 6.7</b>	Varmestrøm gjennom en tolagsvegg .....	173
<b>Eksempel 6.8</b>	Tiden det tar å varme opp vann .....	174
<b>Eksempel 6.9</b>	Avkjølingstid for en massiv kule .....	175
<b>Eksempel 6.10</b>	Tiden det tar å koke et egg.....	176
<b>Oppgave 6.1</b>	Varmedledning gjennom ett lag med isolering.....	176
<b>Oppgave 6.2</b>	Varmedledning gjennom en todelt stav .....	177
<b>Oppgave 6.3</b>	Varmestrøm gjennom en todelt vegg .....	177
<b>Oppgave 6.4</b>	Varmedledning gjennom en tredelt stang.....	178
<b>Oppgave 6.5</b>	Varme gjennom en vegg med isolering på hver side.....	178
<b>Oppgave 6.6</b>	Varmetap fra et rom .....	179
<b>Oppgave 6.7</b>	Varmestrøm gjennom vegg.....	179
<b>Oppgave 6.8</b>	Tykkelse av isolering for fryseboks .....	180
<b>Oppgave 6.9</b>	Varmetap fra vegg og kule.....	180
<b>Oppgave 6.10</b>	Varmeovergang og varmedledning .....	180
<b>Oppgave 6.11</b>	Tiden det tar å avkjøle en potet .....	181

## Kapittel 7

<b>Eksempel 7.1</b>	Energitettheten til elektromagnetisk stråling ved romtemperatur .....	188
<b>Eksempel 7.2</b>	Fotontettheten i den kosmiske mikrobølgebakgrunnsstrålingen.....	191
<b>Eksempel 7.3</b>	Netto utstrålt effekt fra en plate .....	191
<b>Eksempel 7.4</b>	Netto utstrålt effekt fra én person.....	192
<b>Eksempel 7.5</b>	Stråling beskrevet som varmeovergang.....	192
<b>Oppgave 7.1</b>	Temperatur, strålingsfluks og bølgelengde med maks intensitet .....	200
<b>Oppgave 7.2</b>	Spektral radians .....	200
<b>Oppgave 7.3</b>	Temperaturavhengighet til utstrålt energi .....	200
<b>Oppgave 7.4</b>	Ugler og fotoner .....	200
<b>Oppgave 7.5</b>	Gjennomsnittlig energi per foton i elektromagnetisk stråling .....	200
<b>Oppgave 7.6</b>	Reduksjon av strålingstap fra en kule når den omgis av et skall.....	200
<b>Oppgave 7.7</b>	Solas overflatetemperatur .....	201
<b>Oppgave 7.8</b>	Mottatt og avgitt strålingsenergi for en metallplate i solskinn .....	201
<b>Oppgave 7.9</b>	Varmeovergang og stråling.....	201
<b>Oppgave 7.10</b>	Varmeovergang og stråling fra et kopperrør.....	202
<b>Oppgave 7.11</b>	Varmeovergang og stråling fra en radiator.....	202
<b>Oppgave 7.12</b>	Varmeovergang og stråling fra brød som tas ut av en bakerovn.....	202

## Kapittel 8

<b>Eksempel 8.1</b>	Vann og vanndamp i en beholder .....	212
<b>Eksempel 8.2</b>	Smelting, oppvarming og fordampning av is, vann og vanndamp.....	218
<b>Eksempel 8.3</b>	Økning av smeltepunktet til grunnfjell med dybden i jorda.....	219
<b>Eksempel 8.4</b>	Molar fordampningsvarme.....	222
<b>Eksempel 8.5</b>	Dugg på vindu .....	223
<b>Oppgave 8.1</b>	Spesifikt volum av mettede gasser og væsker .....	230
<b>Oppgave 8.2</b>	Fuktig luft i en beholder 1 .....	230
<b>Oppgave 8.3</b>	Fuktig luft i beholder 2 .....	230
<b>Oppgave 8.4</b>	Fuktig luft i beholder 3 .....	231
<b>Oppgave 8.5</b>	Oppvarming av te i mikrobølgeovn .....	231
<b>Oppgave 8.6</b>	Avkjøling av vann med en isbit .....	231
<b>Oppgave 8.7</b>	Faseovergang vann – vanndamp .....	232
<b>Oppgave 8.8</b>	Koking av vann i kjele med lokk.....	232
<b>Oppgave 8.9</b>	Relativ fuktighet .....	232
<b>Oppgave 8.10</b>	Varmekraftmaskin med isblokk som kaldt reservoar.....	232
<b>Oppgave 8.11</b>	Frysing av is ved hjelp av en kjølemaskin .....	233
<b>Oppgave 8.12</b>	Avkjøling og frysing av vann ved hjelp av kjølemaskin .....	233
<b>Oppgave 8.13</b>	Produksjon av is.....	233
<b>Oppgave 8.14</b>	Smelting av is .....	233
<b>Oppgave 8.15</b>	Universets entropiendring ved avkjøling og frysing av vann til is .....	234
<b>Oppgave 8.16</b>	Trippelpunkt, fordampningsvarme og smeltevarme for ammoniakk .....	234
<b>Oppgave 8.17</b>	Fordampningsvarmen til helium .....	234
<b>Oppgave 8.18</b>	Kondensasjon av tetradfluoretan, R-134a .....	234
<b>Oppgave 8.19</b>	Minsking av temperatur og trykk med høyden i atmosfæren....	235
<b>Oppgave 8.20</b>	Van der Waals tilstandslikning .....	235

## Kapittel 9

<b>Oppgave 9.1</b>	Fotongass i ekspanderende univers .....	244
--------------------	---	-----

## Tillegg

<b>Oppgave T.1</b>	Et spinnsystem med negativ absolutt temperatur .....	258
--------------------	--	-----