

Varmelære og strålingslære

Definition på temperatur

Temperatur er det fysiske udtryk for hvor kolde eller varme ting er, eller mere præcist; hvor meget termisk energi de indeholder. Temperatur kan måles på forskellige måder, men generelt kaldes et instrument til måling af temperatur for et termometer.

Gennem tiderne er der blevet brugt en lang række forskellige temperaturskalaer, hvoraf man i Danmark og det meste af Europa kender og primært anvender celsius-skalaen.

Desuden findes fahrenheit-skalaen, som bruges i visse engelsktalende lande udenfor Europa, først og fremmest USA. Skalaerne réaumur- og rankine benyttes stort set ikke længere og er kun interessante i historisk sammenhæng.

I naturvidenskabelige og tekniske sammenhænge anvendes primært kelvin-skalaen, som i modsætning til de andre skalaer ikke er en grad-skala, dvs. der angives ikke noget gradtegn foran enhedsbetegnelsen. En temperatur udtrykt i kelvin omtales også som *absolut temperatur*.

Termisk energi i stoffet

Hvis en stofansamling rummer en vis mængde termisk energi, vil stoffets atomer eller molekyler bevæge sig – jo højere temperatur, desto mere bevægelse. Da atomerne/molekylerne ikke kan "sidde mere stille" end det at være helt ubevægelige, findes der en nedre grænse for temperatur. Denne grænse kaldes for det absolutte nulpunkt, og udtrykt på celsius-skalaen ligger dette punkt ved $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det absolutte nulpunkt, benyttes bl.a. i forbindelse med udregning af støjspænding i elektroniske komponenter.

I gasser er temperaturen direkte proportional med de enkelte atomers/molekylers gennemsnitlige bevægelsesenergi.

Læren om temperaturs egenskaber kaldes termodynamik.

Strålingstemperatur

Legemer ved alt andet end det absolutte nulpunkt udsender elektromagnetisk stråling i et spektrum som er karakteristisk for legemets temperatur. Hvis legemet absorberer al udefra kommende stråling og dermed heller ikke transmitterer stråling kaldes legemet for et sortlegeme, og det vil udsende elektromagnetisk stråling i forskellige bølgelængder, på en måde der kun afhænger af legemets temperatur (Plancks Lov). Dette giver mulighed for at bestemme et legemes overfladetemperatur fra afstand, uden at berøre legemet med et termometer – for eksempel har man på denne måde fastslået overfladetemperaturerne for stjerner der befinder sig snesevis af lysår fra Jorden.

Definitioner

Celsius-skalaen

Celsius-skalaen er defineret ud fra de to almindelige faseovergange for vand ved standard tryk, således at en grad er lig med een $\frac{1}{100}$ af denne forskel i temperatur. De to faseovergange er: 0 °C (frysepunktet) og 100 °C (kogepunktet).

Fahrenheit-skalaen

Fahrenheit-skalaen er på samme måde som Celsius-skalaen defineret ved fryse- og kogepunkter. Fahrenheit benyttede dog saltlage i stedet for vand, hvilket forklarer de anderledes værdier for vands fryse- og kogepunkt. hhv. 32 °F og 212 °F. Det absolutte nulpunkt udtrykt ved Fahrenheit-skalaen er: -459,67 °F

Kelvin-skalaen

Kelvin-skalaen er defineret på baggrund af følgende to forhold:

1. Kelvin- og Celsius skalaen skal vokse lige hurtigt. Dvs.: en temperaturforskel på een Kelvin er identisk med en forskel på een grad Celsius.
2. Kelvin-skalaens definitions punkt er vands tripelpunkt = 0,01 °C = 273,16 K. Tripelpunktet er den temperatur, hvor vand ved et tryk på 611,7 Pa, eksisterer på både fast-, væske- og gasform på een og samme tid. Herved bliver det absolutte nulpunkt: 0 K = -273,15 °C.

Rankine-skalaen

En temperatur angivet ved Rankine-skalaen betegnes med °R evt. °Ra. Rankine-skalaen er *parallel* med Fahrenheit-skalaen på samme måde som Kelvin-skalaen er *parallel* med Celsius-skalaen. USA's standardiserings institut anbefaler dog brug af Kelvin-skalaen i stedet for Rankineskalaen.^[1]

Omregning

- Fahrenheit → Celsius: $^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) * 5/9$
- Celsius → Fahrenheit: $^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} * 9/5 + 32$

De to skalaer skærer hinanden ved -40, idet: -40 °F = -40 °C

- Celsius → Kelvin: $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$
- Kelvin → Celsius: $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$

I formler angives temperatur i kelvin dog traditionelt med T, mens celsiusgrader angives med t.

Réaumur °R = 4/5 °C benyttes ikke længere.

Termisk energi og varme

Dette afsnit vil omhandle termisk energi og varme, tilstandsformer, varmekapacitet, smeltevarme og fordampningsvarme. Vi skal ind på ændringer i tilstandene i den termiske energi, og se på hvad der sker ved faseovergangene. Derudover skal vi kende til smeltevarme og fordampningsvarme.

Definition af varme

Varme er tilførsel eller afgivelse af termisk energi.

Varme

Definitionen på varme betyder altså at varme ikke er et stof, man kan flytte. En fysiker der hed Robert Brown [\(1\)](#) opdagede i 1827 at partiklerne i plantesporer bevægede sig. Det der bevæger sig, er partikler der støder ind i hinanden og det udsender en energi. Det betyder, at jo hurtigere partiklerne støder ind i hinanden, jo mere bevægelsesenergi får de og jo højere bliver deres termiske energi. Den termiske energi er derfor den samlede bevægelsesenergi af partiklernes stød, ind i hinanden.

Termiske energi

Den termiske energi er et udtryk for hvor varmt et bestemt stof er. Den termiske energi kan man ændre ved at udføre et arbejde på stoffet eller ved at tilføre varme. Dette er kendt som varmelærens første hovedsætning

$$\Delta E_{term} = Q + A$$

Hvis man vil udføre et arbejde på et system, skal der en strækning og en kraft til. Fx kan man gnide hænderne mod hinanden, og man vil kunne mærke at hænderne blive varmere. Der udfører man et arbejde, hvor kraften er hænderne man presser ind mod hinanden, og strækningen er at man kører hænderne frem og tilbage.

Formlen for arbejde, A, ser således ud: $A = F \cdot s$

hvor s er strækningen, altså igen bruger vi eksemplet når man gnider sine hænder sammen, vil strækningen være, hvor langt frem og tilbage, man gnider sine hænder. F er kraften, som er hvor hårdt man presser hænderne mod hinanden.

Hvis man derimod vil tilføre varme til et system, skal man have en varmekilde af en art. Det kan være en dypekoger, elkedel mm. Når en varmekilde overfører varme til systemet, behøver der ikke være en strækning eller kraft, men bare en kilde. Et eksempel ville være at holde en hånd over et stearinlys, og lyset vil så tilføre varme til hånden. Det får på simpelt vis håndens temperatur til at stige, og dermed stiger håndens termiske energi også.

Varmetransport/varmetilførsel

Varmetransport sker når fx en varm kogeplade møder en kold gryde og atomerne i den øverste del af kogepladen støder ind i grydens kolde flade. Når de hurtige atomer i kogepladen støder ind i de langsomme atomer i gryden får grydens langsomme atomer større bevægelsesenergi, og bliver derved varmere.

Varmetransporten er nem at forstå hvis man går helt ned på det atomare niveau. Forestil dig to messingklodser, hvor den ene er meget varm og den anden er kold. Nu skal der transporteres varme fra den ene til den anden. Man lægger så messingklodserne helt tæt op ad hinanden, og ved overfladerne vil den varme klods' atomer bevæge sig ind i den kolde klods' atomer. Den varme klods' atomer vil støde ind i de i de kolde atomer og afgive noget af dens bevægelsesenergi til de kolde atomer og derved overgive noget af fart. Der sker en udveksling af varme i overfladen, som langsomt vil bevæge sig hele vejen igennem klodsen. Varmeudvekslingen stopper altså så snart, at alle atomerne i klodserne har samme termiske energi, og de alle sammen bevæger sig lige hurtigt.

Varmeledning og varmestråling

Varmeledning er, når der er direkte kontakt mellem de hurtige atomer fra en varmekilde, fx kogeplade, til langsomme atomer, fx i en grydes bund. Atomerne støder direkte ind i noget koldere og sætter grydens langsomme atomer i gang, så bevægelsesenergien blandt de langsomme atomer bliver højere.

Varmestråling sker hele tiden af ting der er varmere end det absolutte nulpunkt, altså 273,15 K. Alle legemer over nulpunktet udsender elektromagnetiske bølger, men det afhænger af hvor varmt legemet er. Jo varmere, jo mere effekt kommer der fra den udsendte stråling.

Tilstandsformer

I faste stoffer bevæger partikler sig, men meget lidt. De vibrer kun lidt hvilket medfører at deres termiske energi lille.

I flydende stoffer bevæger partiklerne sig vildere og har ikke samme "faste pladser" som partiklerne i faste stoffer har. Her bevæger de sig rundt i mellem hinanden men stoffet forbliver flydende.

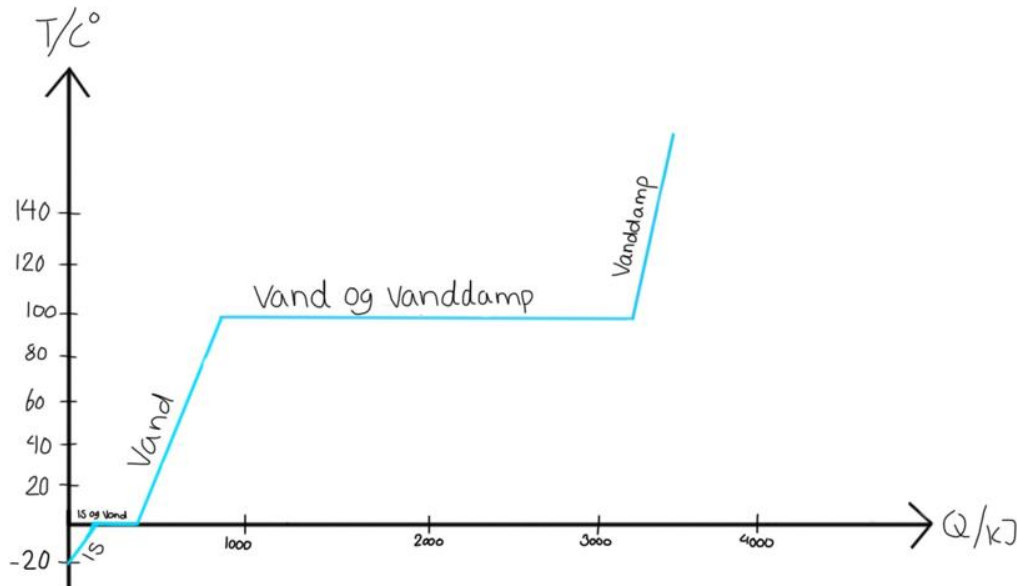
I gas er partiklerne ustyrlige og de bevæger sig som de vil helt frit. Gas har en høj termisk energi fordi den har en høj bevægelsesenergi.

Faseovergange

Når stofferne skal skifte tilstandsform, skal de tilføres en bestemt mængde energi, for fx at bryde bindingerne imellem atomerne i et fast stof. Stoffets temperatur stiger ikke under faseovergangene, da den ekstra tilførte energi bliver brugt til at bryde bindingerne imellem fx vandatomerne i en isterning. Imens varmeenergien bliver brugt til at bryde bindinger vil stoffet altså ikke ændre temperatur, før alle bindinger er brudt.

Derfor ser en tilstandsformkurve sådan ud som på næste side:

Figur 28. Tilstandsdiagram



Varmekapacitet og specifikvarmekapacitet

Varmekapacitet

Varmekapacitet er et udtryk for et stofs evne til at optage eller afgive varme. Forskellige stoffer, har forskellig varmekapacitet. Man kan lave forsøg med hvad de enkelte stoffers varmekapacitet er. Der er nogle betingelser der skal stemme over ens, når man laver disse forsøg. Man skal opvarme et stof og måle stoffets start temperatur og slut temperatur. Man måler med et elektrisk termometer. Vi vil i dette eksempel bruge vand, som vi opvarmer med en elkedel.

Vi måler vandets temperatur før det bliver sat til kogning, som vi kalder for T_{start} og et stykke tid efter, f.eks. når vandet begynder at dampe en smule, måler vi sluttemperaturen som vi kalder T_{slut} . Under kogningen ville den elektriske energi blive omdannet til varmen energi og til sidst som termisk energi i vandet. For at finde ud af hvor meget vandets termiske energi er steget, trækker man T_{start} fra T_{slut} .

Den tilførte varme, altså Q , er proportional med temperaturstigningen, $T_{\text{slut}} - T_{\text{start}}$. For at vise det, kan man starte med først at tilføre energi og måle temperaturen. Derefter kan man så tilføre dobbelt så meget energi, og så vil temperaturen stige dobbelt så meget. Derfor kan vi konkludere at Q er direkte proportional med temperaturstigningen. Det kan udtrykkes ved følgende formel, som også er formelen for varmekapacitet:

$$C = T_{\text{slut}} - T_{\text{start}}/Q$$

Da formelen er udtryk for proportionalitet, vil den som graf være lineær.

Man antager at alt varmen fra varmekilden går direkte til opvarmningen af stoffet. Denne opvarmning skal naturligvis foregå inde for en tilstand, så det stemmer overens med tidligere teorier om faseovergange og tilstandsforme.

Enheden for varmekapacitet bliver $[C] = J/K$. Joule kommer fra energis enhed og Kelvin fra temperatur.

Specifik varmekapacitet

Specifik varmekapacitet adskiller sig fra varmekapacitet på et område. Nemlig at specifik varmekapacitet siger noget om hvor meget tilført varmen energi der skal til, for opvarme 1 kg, af et bestemt stof 1 grad. Der er et led mere i formlerne for specifik varmekapacitet, og det er masse. Når man vil finde et stofs specifikke varmekapacitet skal man kende både varmekapaciteten og hvilke mængde stof der indgår. Som vi før har nævnt var C proportionel med m, hvilket jo også betyder at varmekapacitetens af en bestemt mængde af et bestemt stof vil være proportionel med stofmængdens masse. Derfra kan vi udlede følgende formel: $C=c \cdot m$, hvor C er varmekapaciteten, m er massen af stoffet og c så er den specifikke varmekapacitet. Da vi gerne ville finde ud af formelen for c, dividere vi med m på begge sider af lighedstegnet og får: $c = C/m$

Enheden er her $[c] = \frac{J}{kg} \cdot K$, da C har enheden J/K og m har enheden kg.

Smeltevarme og fordampningsvarme

Faseovergange er noget vi allerede har været inde på, men da det også har noget at gøre med smelte- og fordampningsvarme kommer der her noget mere. Vi ved fra tidligere at den tilførte energi stiger sammen med temperaturen, men ved faseovergangene bliver alt den tilførte energi brugt til at gøre fx en hel isterning 0 grader celsius. Det betyder så at temperaturen er konstant under en faseovergang.

Denne proces sker fra fast til flydende og fra flydende til gas. Det sker selvfølgelig også fra gas til plasma, men det arbejder vi ikke med, da det typisk sker ved ekstremt høje temperaturer.

Smeltepunktet for f.eks. vand er 0 grader celsius, som er der hvor is bliver til vand. Kogepunktet er så ved 100 grader celsius hvor vand bliver til damp. Ligeså har alle andre stoffer et sted hvor de overgår fra fast til flydende og et punkt hvor de overgår fra flydende til gas.

Ved kogepunktet spiller tryk en lille rolle. Her i Danmark vil trykket dog altid være 1 atm da Danmark ingen høje bjerge har. Jo højere man kommer op, jo lavere bliver trykket og vand vil koge hurtigere. Men i lave højder, fx i Danmark vil vand derfor koge ved kogepunktet, 100 grader celsius. Man kan se mere om tryk og finde tabeller i FYSIK KEMI DATABOGEN.

Under afsnittet og smelte- og fordampningsvarme, vil vi jo gerne finde ud af, hvordan man kan udlede et bestemt stofs specifikke smeltevarme og fordampningsvarme. Til det skal vi kende til begrebet varmemængde.

Varmemængde er et begreb der bruges til at beskrive hvor meget varme der skal tilføres til at stof før det enten bliver flydende eller til gas. Varmemængde siger også noget

om et stofs specifikke smeltevarme eller fordampningsvarme, nemlig hvor meget varme der skal tilføres pr. masse for den smelter eller fordamper.

Vi lægger ud med specifik smeltevarme og vi kender en formel hvor specifik smeltevarme indgår.

$$Q = m * L_s$$

Q = er varmemængden der skal tilføres for at smelte hele massen med den tilhørende specifikke smeltevarme. Q har enheden J, da det er en energimængde der tilføres. m = er den mængde stof der skal smeltes i J/kg, L_s = er den specifikke smeltevarme som så får enheden J/Kg

For at finde den specifikke smeltevarme kan vi isolere L_s i formlen. Det gør vi ved at dividere med massen m, på begge sider

$$Q = m * L_s \Leftrightarrow L_s = \frac{Q}{m}$$

Nu har vi en formel man kan bruge til at finde den specifikke smeltevarme. Data til stoffers specifikke smeltevarme kan igen slås op.

Eksempel

Vi skal smelte 22 kg is, hvor meget energi skal der tilføres?

Da vi ved at vand har en smeltevarme på 334 J/K, kan vi bruge følgende formel, da L_s og m er givet i en sammenhæng ved: $Q = m * L_s$

Nu indsætter vi værdierne:

$$Q = 22 \text{ kg} * \frac{334 \text{ J}}{\text{kg}} = 7348 \text{ J}$$

Fordampningsvarme

Nu er vi videre til fordampningsvarme. Det er samme princip som smeltevarmen hele vejen igennem.

Vi skal finde ud af at definere specifik fordampningsvarme. Den specifikke fordampningsvarme betegnes således: L_f .

Den varmemængde der skal tilføres pr. masse, for at kunne fordampe det givne stof, er definitionen af den specifikke fordampningsvarme. Formlerne er næsten ens, undtagen specifikke fordampningsvarme, som har en værdi, der ligger et helt andet sted på temperaturskalaen.

$$Q = m * L_f$$

Nu når vi ved hvad alle symboler står for, kan vi med det samme isolere L_f og dermed finde frem til ligningen for specifik fordampningsvarme. Igen dividerer vi med massen m, på begge sider af lighedstegnet.

$$Q = m * L_f \Leftrightarrow L_f = \frac{Q}{m}$$

Nu har vi udledt formelen for specifik fordampningsvarme og er nu klar til at bruge form-
lerne.

Her er der et eksempel også med fordampningsvarmen.

Eksempel

Nu skal vi fordampe 1,5 L vand.

Igen ved vi hvilken specifik fordampningsvarme vand har nemlig 2257kJ/kg. L_f og m
har en sammenhæng givet i følgende formel:

$$Q = m * L_f$$

$$\text{Nu indsætter vi værdier} \quad Q = 1,5 \text{ kg} * \frac{2257 \text{ kJ}}{\text{kg}} = 3385,5 \text{ kJ}$$

Varmetransport.

Vi skal se på hvordan varme kan transporteres fra et sted til et andet. Man kan
lave en række øvelser med varmeoverførsel enten ved:

- Afkøling af et æg.
- Opvarmning af vand i en elkedel og derefter afkøling af vand i et flammegobæger.
- Opvarmning af en termoføler efter spritten er fordampet.
- Opvarmning i en Lesliekub.

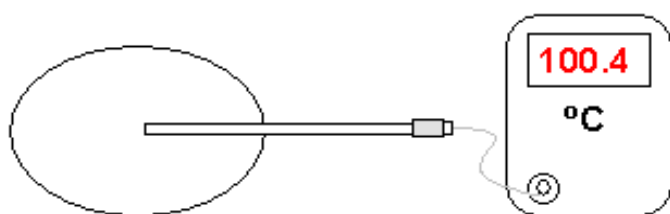


Fig. 1. Ved afkøling af et æg vil varmen transporteres ud til omgivelserne ved varmeledning.

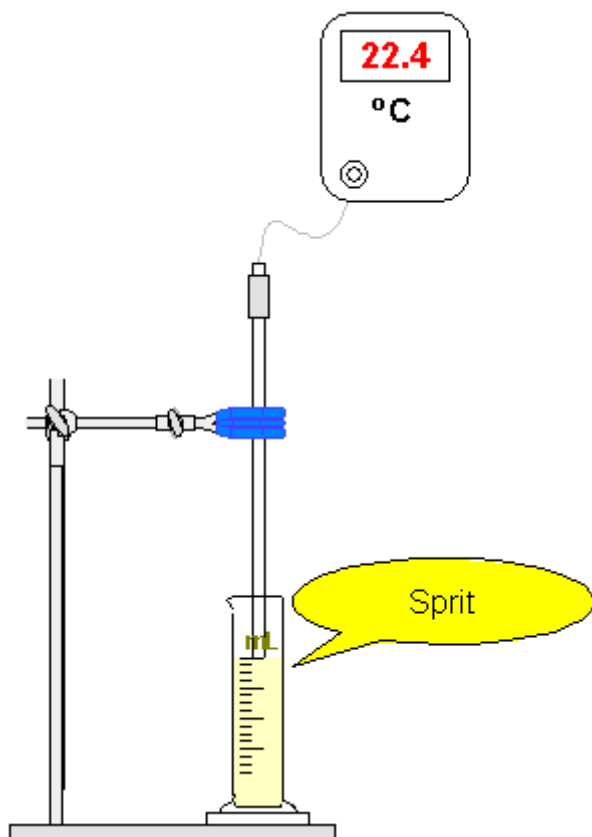


Fig. 2. Ved fordampning af sprit og efterfølgende opvarmning af en termoføler sker opvarmningen ved varmeledning.

Konvektion

Så snart der forekommer en temperaturforskel mellem to steder, vil der foregå en varmetransport fra det varmere til det koldere sted. Varmetransporten kan foregå på tre forskellige måder:

- Konvektion: som betyder føre sammen. Forsøg med opvarmning af vand.
- Varmeledning. Afkøling af et æg og opvarmning af en termoføler i sprit.
- Varmestråling. Opvarmning af en pære i Lesliekuben.

Konvektion optræder når varmt vand stiger op i koldere vand, se figuren underneden. Der er tale om at vandet faktisk bevæger sig, det vil sige en stoftransport. Det kan også være varme der strømmer fra et hus til omgivelserne.

Konvektion

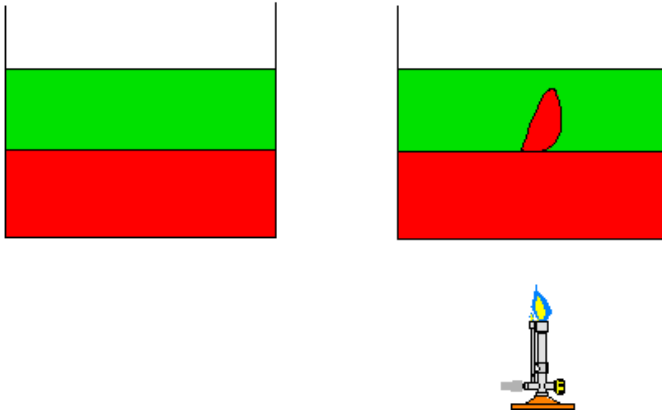


Fig. 3. I karret til venstre har vi to forskellige væsker men med den samme temperatur. Hvis vi begynder at opvarme karret med væsken, vil den nederste væske bevæge sig op i den overliggende væske ved konvektion. Det er skitseret på det højre kar.

Et andet eksempel vi godt kender. Varm luft stiger der stiger op og danner en havbrise (selv på en ellers vindstille dag) fra havet mod land om morgenen. Til stor irritation for de badende ved stranden. Om eftermiddagen går brisen i den modsatte retning fra land ud over havet.

Søbrise om morgenen

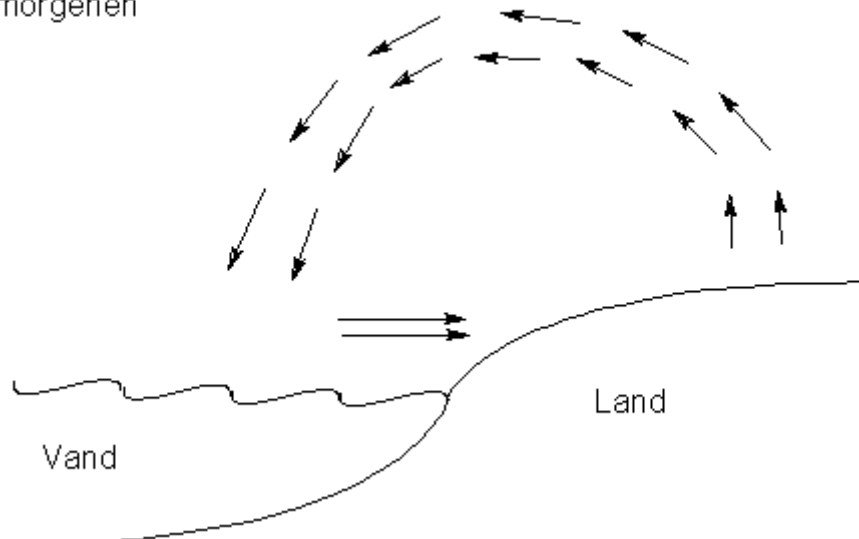


Fig. 4. Om morgenen vil luften bevæge sig fra hav mod land. Pilene angiver retningen af luftstrømningen.

Varmedledning

Varmedledning foregår typisk i faste stoffer. En gryde der opvarmes på en kedel. Her er det atomerne i metallet, der begynder at svinge kraftigere og dermed leder varmen videre. Der foregår derfor ingen transport af materiale, i modsætning til konvektion.

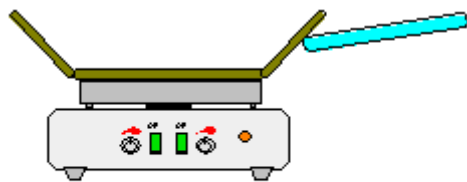


Fig. 5. Ved opvarmning af en stegepande sker opvarmningen ved varmedledning.

Lad os se lidt på konvektion/varmedledning i detaljer. Betragt et vindue eller mur af tykkelse h , tværsnitsareal A , indetemperatur: T_2 og udetemperatur: T_1 .

Vi antager at stuetemperaturen er højere end udetemperaturen, så varmen strømmer ud til gråspurvne. I en idealsituation vil varmetransporten kun foregå ved varmedledning. Temperaturen falder jævnt ud gennem vinduet.

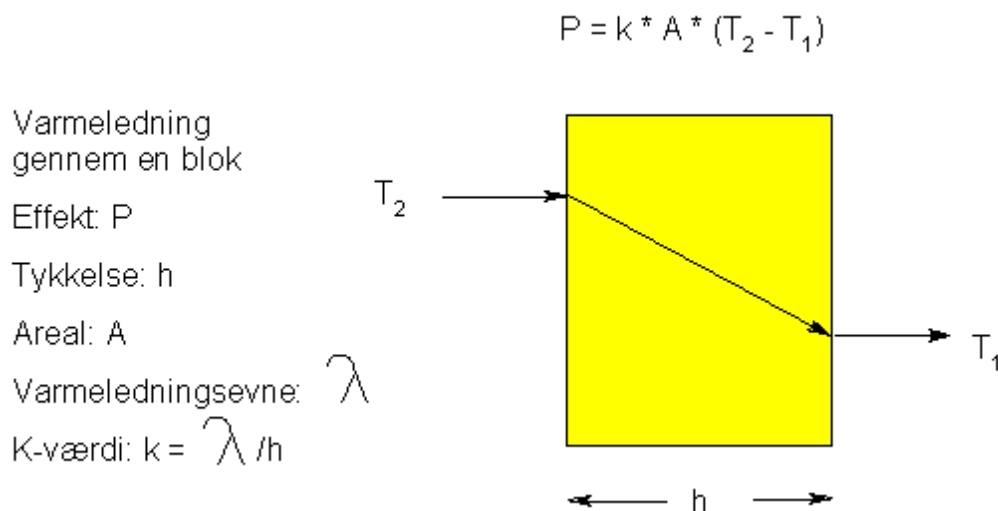


Fig. 6. Her er en skitse af et vindue eller mur med tykkelse h og tværsnitsareal A . Indetemperaturen er T_2 og udetemperaturen er T_1 . I muren vil der indstille sig en ligevægt, så temperaturen falder lineært.

Vi indfører **varmeledningsevnen** λ der måles i Watt per meter per Kelvin og den mere kendte k-værdi som måles i Watt per kvadratmeter per Kelvin. Der gælder:

$$k = \frac{\lambda}{h}$$

Varmetabet eller den udstrålede effekt P er givet ved formelen, også kaldet **Newtons afkølingslov**:

$$P = \lambda \cdot \frac{A}{h} \cdot (T_2 - T_1)$$

I praksis vil der omkring vinduet opstå et grænselag både indenfor og udenfor vinduet, hvor der foregår en konvektion. Indenfor vinduet vil konvektionen være opad og udenfor ruden opad. For at reducere varmetabet kan man benytte tolags glas eller termoruder, såkaldt 4-12-4-glas. Her er glasset 4 mm tykt og luftlaget er 12 mm tykt.

Varmedledning gennem en blok. Praksis

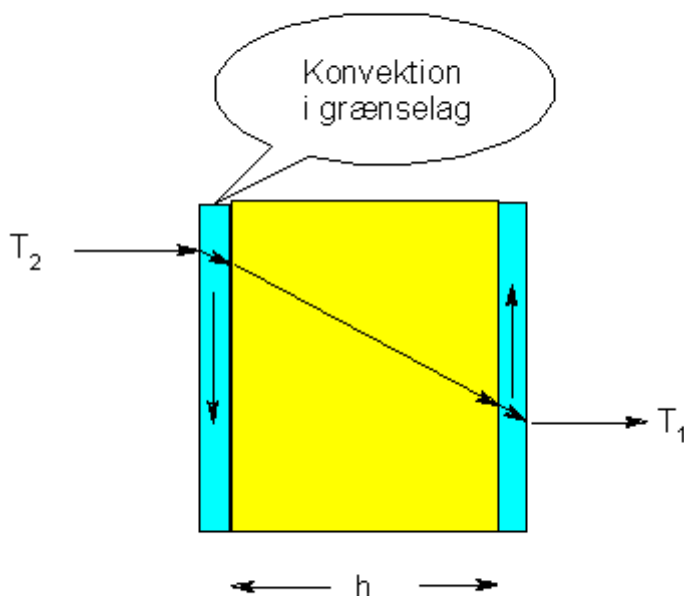


Fig. 7. Varmedledning gennem glas eller mur i praksis. Såvel indenfor som udenfor vil der dannes et grænselag, hvori der opstår konvektion. På figuren kan vi se at indenfor vil konvektionen være nedadrettet og udenfor være opadrettet.

Der er meget stor forskel på byggematerialers varmeledende egenskaber. Glas er en relativt god varmeleder, medens luft er en dårlig varmeleder. Derfor er det en god ide at benytte termoruder. Tilsvarende gælder for isolering af hult mure med mineraluld. Her en tabel over nogle byggematerialers varmeledningsevner:

Stof	λ W/(m * K)
Beton	1,2
Gasbeton	0,24
Lecamursten	0,40
Rudeglas	0,8
Mineraluld	0,045
Luft	0,026

Hvis man har to lag med k_1 og k_2 kan man benytte en effektiv k-værdi. Der må gælde for hele laget at:

$$P = k \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \Leftrightarrow T_2 - T_1 = \frac{P}{k \cdot A}$$

Tilsvarende gælder for de enkelte lag:

$$T_x - T_1 = \frac{P}{k_1 \cdot A}$$

$$T_2 - T_x = \frac{P}{k_2 \cdot A}$$

Projekt 1. Vis ud fra TER (2.3) og TER (2.4) at:

$$\frac{P}{k \cdot A} = \frac{P}{k_1 \cdot A} + \frac{P}{k_2 \cdot A}$$

og dermed for den samlede k-værdi:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

Der vil indstille sig en temperaturligevægt hvor den udstrålede effekt er ens i de to lag. Vis at i overgangslaget er temperaturen givet ved, et udtryk der ligner formelen for blandingstemperaturen meget:

$$T_x = \frac{k_1 \cdot T_1 + k_2 \cdot T_2}{k_1 + k_2}$$

Varmeledning gennem
to blokke:

Effekt: $P_1 = P_2 = P$

Areal: $A_1 = A_2 = A$

Højde: h_1 og h_2

Varmeledningsevne: λ_1 λ_2

K-værdi: k_1 og k_2

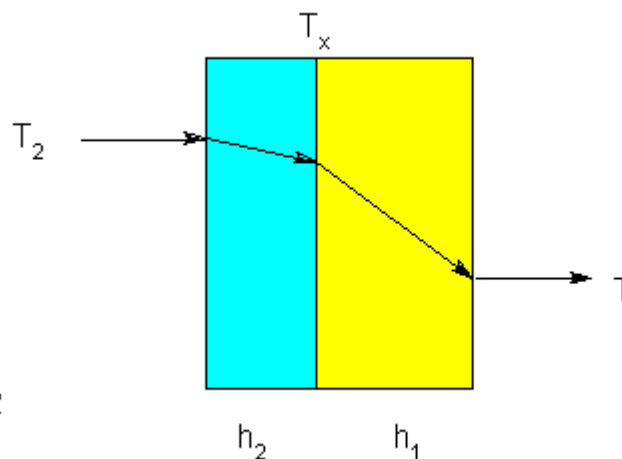


Fig. 8. Varmeledning mellem to lag glas. Der vil indstille sig en ligevægt så den varmemængde der strømmer gennem de to forskellige lag glas er ens. Fællestemperaturen vil ligge mellem inde- og udetemperaturen.

Varmestråling

Varmestråling er faktisk en speciel form for elektromagnetisk stråling, normalt IR-stråling (infrarød). Uden den ville solens energi ikke kunne udbrede sig til os. Varmestråling er specielt kendt fra brændeovne af stråletype. I en brændeovn sker der en kemisk omdannelse af kulstof, nemlig en forbrænding af træ. Ved denne forbrænding frigøres der kemisk energi i form af strålevarme.

På solen foregår forbrændingen helt anderledes. Inde i solens centrum foregår der såkaldte kerneprocesser, hvori 4 hydrogenatomer bliver omdannet til et heliumatom plus nogle lette partikler, ved en proces der benævnes fusion (at forene). Ved denne kerneprocess frigives der energi fordi de 4 hydrogenatomer tilsammen vejer mere end heliumatomet og de lette partikler. At der derved frigives energi skyldes Einstein der viste: at hvis der var en masse m i overskud kunne der frigøres en energi $E = m \cdot c^2$, hvor c er lyshastigheden.

Kerneprocessen sker ved en ekstrem høj temperatur ca. 15 millioner grader, ellers kan hydrogenatomerne ikke overvinde den elektriske frastødning. Varmen bliver nu transporteret ud gennem solen ved konvektion, altså vil stoffet bevæge sig udad til solens overflade. Ved solens overflade er temperaturen faldet til ca. 6000 K. Når vi modtager solens varme sker det ved varmemestråling som kendes fra en lampe der er tændt.

For varmemestråling viser det sig at effekten (målt i Watt) som er energien i Joule per sekund afhænger at temperaturen T målt i Kelvin. For at omregne fra grader Celsius til Kelvin skal du blot lægge 273.

Det er praktisk at vide hvor stor effekten er per kvadratmeter.

Derfor indfører vi: **Strålingens intensitet I** ,

Sammenhængen mellem I og T betegnes Stefans lov:

$$I = \sigma \cdot T^4, \text{ hvor tallet } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

Projekt 2. Eftervis denne lov ved forsøg med en Lesliekugle.

Den udstrålede effekt fra en kugle med radius R er bestemt ved kuglens areal $4 \cdot \pi \cdot R^2$ ganget med intensiteten.

$$P_{\text{ud}} = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot I$$

Ved at benytte disse to formler er vi forbløffende nok i stand til at forstå hvor meget energi jorden og de andre planeter modtager. Du skal i det følgende bestemme den samlede udstråling fra solen, også kaldet solens Luminositet:

Projekt 3. Udenfor jordens atmosfære er **solarkonstanten** S_0 lig 1353 Watt per kvadratmeter. Jorden befinder sig i afstanden $1,496 \cdot 10^{11}$ m fra Solen. Solen udsender lys i alle retninger og vil dække en kugle med den givne radius. Bestem arealet i kvadratmeter af en kugle med denne radius. Benyt at arealet af en kugle er $4 \cdot \pi \cdot R^2$.

Projekt 4. Benyt TER (2.9) til at bestemme Solens luminositet. (Den bliver ca. $4 \cdot 10^{26}$ Watt)

Projekt 5. Solens radius: $R = 6,96 \cdot 10^8$ m. Bestem arealet i kvadratmeter af solen.

Projekt 6. Bestem Solens intensitet i Watt per kvadratmeter.

Projekt 7. Benyt endelig TER (2.8) til at angive Solens temperatur i Kelvin på overfladen!!!! (Den bliver ca. 6000 K)

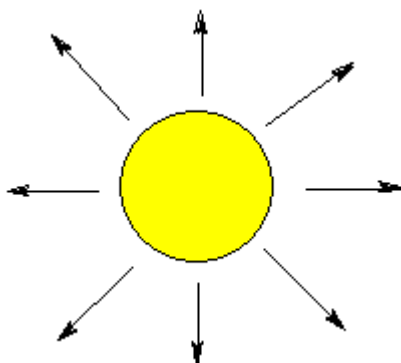


Fig. 9. Solens udstråling fra overfladen. Inde i solens centrum foregår der kerneprocesser, hvor hydrogen bliver omdannet til helium ved fusion. Det sker ved 15 millioner grader. Varmen bliver transporteret ud gennem solen ved konvektion, altså vil stoffet bevæge sig udad. Ved solens overflade er temperaturen faldet til ca. 6000 K. Når vi modtager solens varme sker det ved varmestråling som kendes fra en lampe der er tændt.

$$S_0 = \frac{P_{\text{ud}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Projekt 8. Afstanden fra solen til en af planeten Saturns måner Titan er $1,427 \cdot 10^{12}$ m. Bestem Solarkonstanten ved Titans overflade og giv et bud på overfladetemperaturen!!!

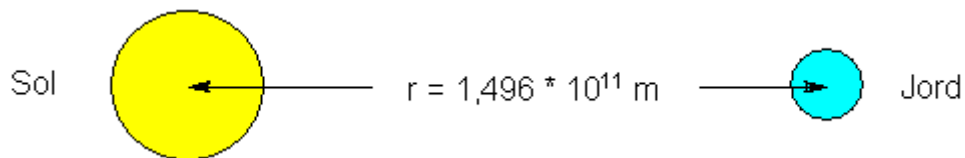


Fig. 10. Skematisk billede af jorden og solen. Størrelsesforholdene passer slet ikke, da solen er meget større end jorden.

Drivhuseffekten

Når sollyset rammer jorden hvad sker der så. I en simpel model, hvor jorden og atmosfæren betragtes under et, vil ca. 70 % af solenergien blive absorberet af jorden og 70 % vil blive kastet tilbage til verdensrummet, som IR-stråling.

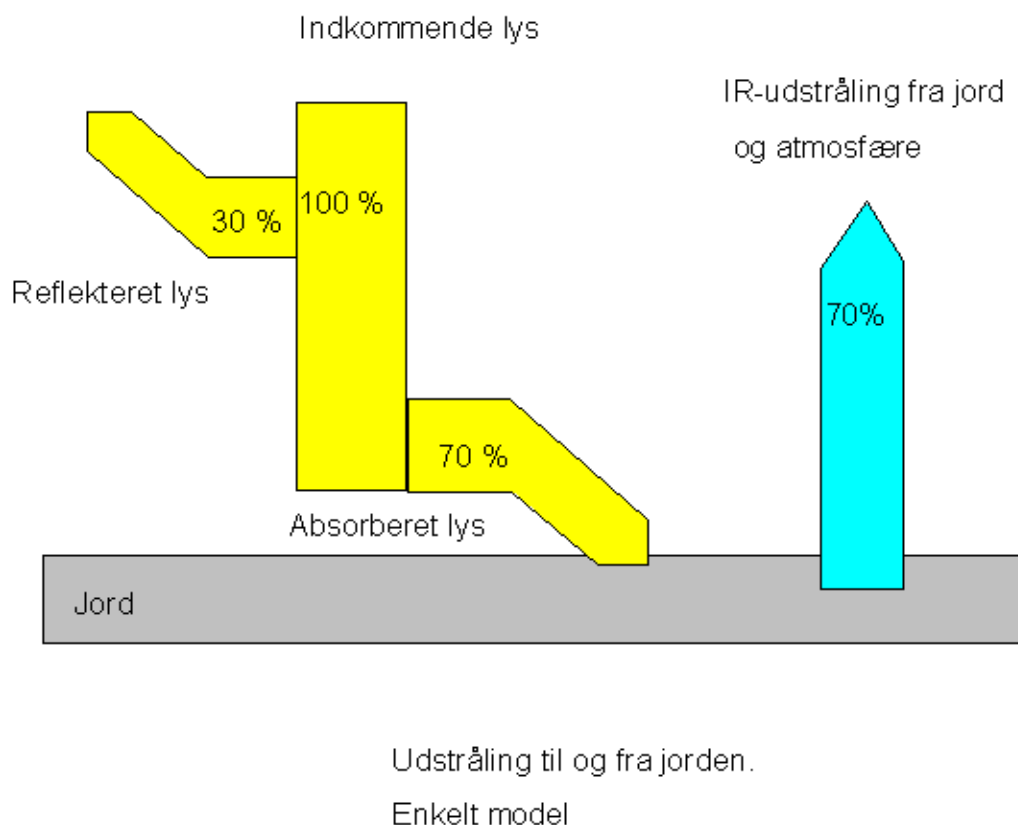


Fig. 11. Jordens drivhuseffekt i den mest enkle udgave. 30% af sollyset reflekteres fra jordens atmosfære. Pilen angiver retningen af strålingen.

Hvis jorden og atmosfæren betragtes som uafhængige bliver billedet mere kompliceret. Der foregår også en varmetransport ved fordampning og konvektion fra jorden til atmosfæren.

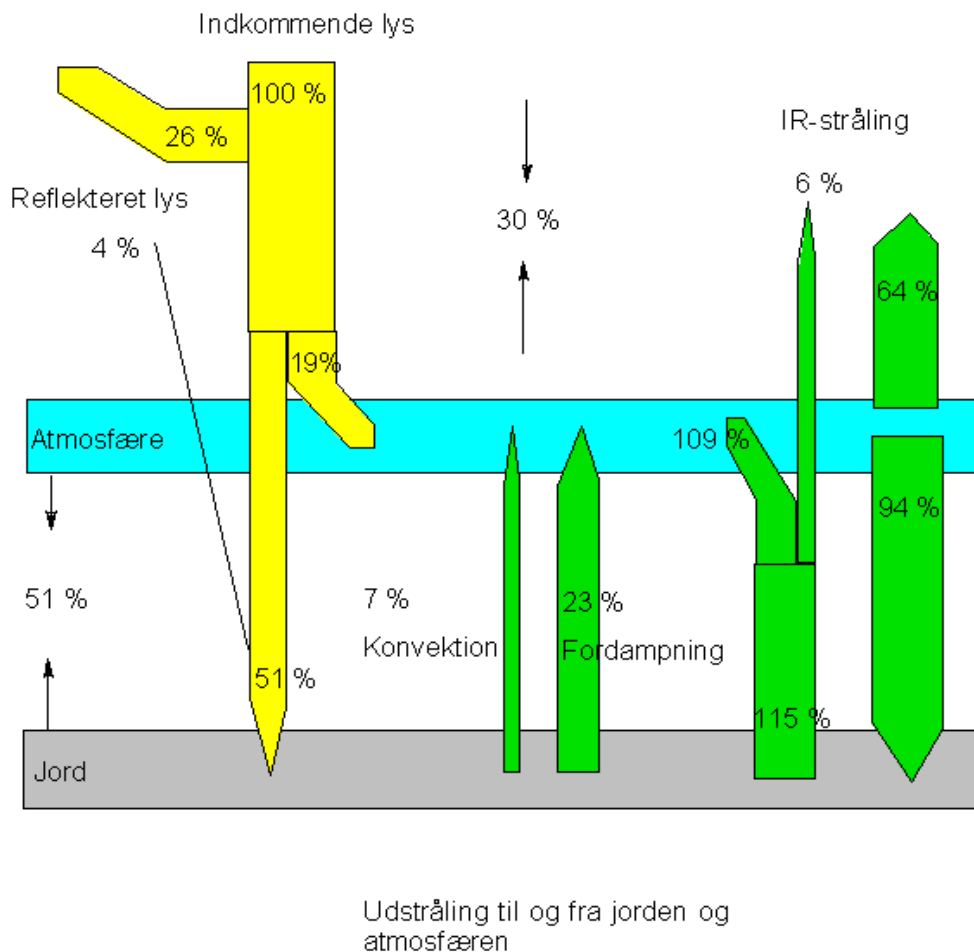


Fig. 12. Jordens drivhuseffekt i en mere kompliceret udgave, hvor der også tages hensyn til konvektion og fordampning i atmosfæren.

Der vil stadigvæk være ca. 70 % der stråler ind og ud af atmosfæren til verdensrummet, medens der strømmer ca. 51 % ind og ud af jorden til atmosfæren.

Vi vil give et bud på jordens temperatur ved at benytte Stefans lov. Når jorden belyses af solen vil halvdelen af jordens areal være belyst. Betragtes denne halvdel, vil ved forårsjævndøgn eller efterårsjævndøgn ækvator være belyst 100% medens polerne netop ikke vil være belyst. Man kan vise at i snit vil det belyste areal kun modtage 50% lys. Det svarer til at set fra solen ligner jorden en skive med radius $R = 6,380 \cdot 10^6$ m. Da den indstrålede energi skal fordeles på hele jordens areal, vil intensiteten på jorden være 1/4 af solarkonstanten:

$$I = 0,70 \cdot 1/4 \cdot S_0$$

Vi har taget hensyn til at kun 70% af energien udnyttes.

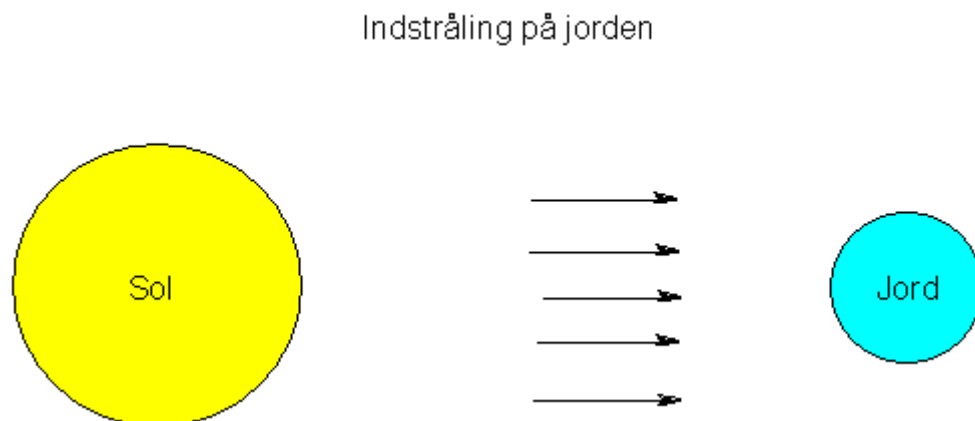


Fig. 13. Solens indstråling på jorden. Set udefra vil jorden virke som en skive.

Projekt 9. Bestem intensiteten for jorden ud fra TER (2.11).

Projekt 10. Bestem endelig jordens temperatur ved at benytte Stefans lov:

TER (2.8). Du får sikkert en for lav værdi i forhold til jordens middeltemperatur $T = 288 \text{ K}$. Forskellen skyldes drivhuseffekten.

Projekt 11. Titan har en radius på $2,575 \cdot 10^6 \text{ m}$ og derfor sammenlignelig i størrelse med jorden. Man mener at Titan ligner jorden i dens tidlige udvikling.

Giv en vurdering af temperaturen på Titan og forklar at der kan være søer af flydende metan. Ved luftens normale tryk er methans kogepunkt - $161,5 \text{ °C}$.

Udstråling fra jorden

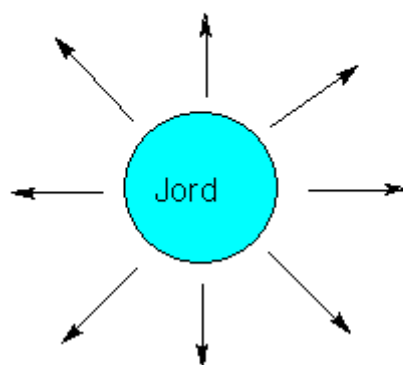


Fig. 14. Når vi skal se på jordens udstråling, skal vi tage hensyn til at udstrålingen sker fra hele kuglens areal.