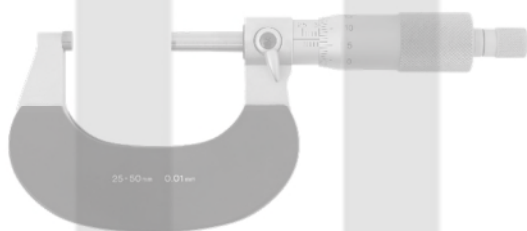


MÅLING AF TEMPERATUR VED HJÆLP AF STRÅLING - TEORETISK DEL

UNDERVISNINGSELEMENT

T5

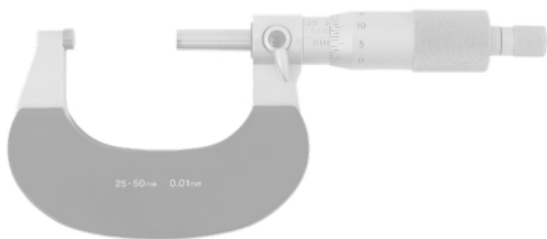
—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK



MÅLING AF TEMPERATUR VED HJÆLP AF STRÅLING - TEORETISK DEL

Knud A. Baltsen, FORCE Technology

2. udgave – Juni 2018



Copyright © 2017 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug, uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2018. Materiale er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology.

Læs mere om projektet på www.metrologi.dk.

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisningsmaterialet eller i indholdet på websitet, samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	1	3.4 Emissionsfaktorens betydning for temperaturangivelsen	9
Elektromagnetisk stråling	1	4 Fordele og ulemper ved temperaturmåling via stråling	12
2 Radiometri	4	5 Referencer og litteraturhenvi- sing	13
Steradian og rumvinkel?	4	6 Forudsætninger m.m.	14
3 Termisk stråling	5	6.1 Om dette UE	14
3.1 Definition af absorptions- og emissionsfaktor	5	6.2 Læringsudbytte	14
3.2 Radiansen fra et absolut sort legeme	5	6.3 Forudsætninger	14
Plancks geniale interpolation: Kvantefysikkens begyndelse	7		
3.3 Praktiske værdier for absorptions- og emissionskoefficienter	8		

1 Indledning

Måling af temperatur er en af de hyppigst forekommende metrologiske målinger. I dette undervisnings-element (UE) behandles temperaturmåling ved hjælp af termisk stråling. Her udnyttes at ethvert objekt med en temperatur større end det absolutte nulpunkt ($= 0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$) vil udsende termisk stråling. Den termiske stråling er elektromagnetisk bølgeudbredelse (EM-bølger) som f.eks. radiobølger.

Elektromagnetisk stråling

James Clark Maxwell forudsagde og beskrev i 1864 eksistensen af EM-bølger. I hans arbejde kunne han bl.a. fastslå, at udbredelseshastigheden v af EM-bølger generelt er lysets hastighed.

I vakuum er lysets hastighed en naturkonstant c med værdien $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. I luften, som omgiver os, vil udbredelseshastigheden v være ca. 0,3 % mindre end c (altså meget lidt mindre). Derfor kan man i praktisk anvendelse sætte $v = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Sammenhængen mellem bølgelængde λ , frekvens f og v er givet ved

$$v = \lambda \cdot f$$

I dag er anvendelsen af EM-bølger jo bl.a. forudsætningen for al trådløs kommunikation, og derfor så almindelig, at man nærmest ikke tænker over den store betydning anvendelsen af EM-bølger har.

I 1887 kunne Heinrich Hertz ved forsøg påvise eksistensen af EM-bølger.

Figur 3 viser det frekvens- og bølgelængdeinterval som den praktiske anvendelse af EM-bølger har.

Ofte kalder man termisk stråling for *varmestråling*.

For hver temperatur større end det absolutte nulpunkt vil den termiske stråling omfatte alle bølgelængder, - i princippet fra nul til uendeligt lange bølgelængder. I praksis vil både de meget korte og de meget lange bølgelængder være af så lille styrke, at de ikke kan måles, da de forsvinder i målestøj.

For en given temperatur af objektet vil der være en bølgelængde, hvor der er maksimal udstråling. Forløbet af denne udstrålingskurve behandles nærmere i kapitel 4- Termisk stråling.

Forløbet af den termiske strålingsstyrke som funktion af bølgelængden fastlægger således objektets temperatur. For strålingens styrke vil betegnelsen *radians* blive udledt i kapitel 3.

Da der er tale om stråling kan temperaturen måles uden berøring, og dette er én af de meget store fordele ved at foretage temperaturmåling ved hjælp af stråling.

Et eksempel på et instrument, som måler temperaturen ved hjælp af stråling, er *strålingstermometeret* vist på figur 1.



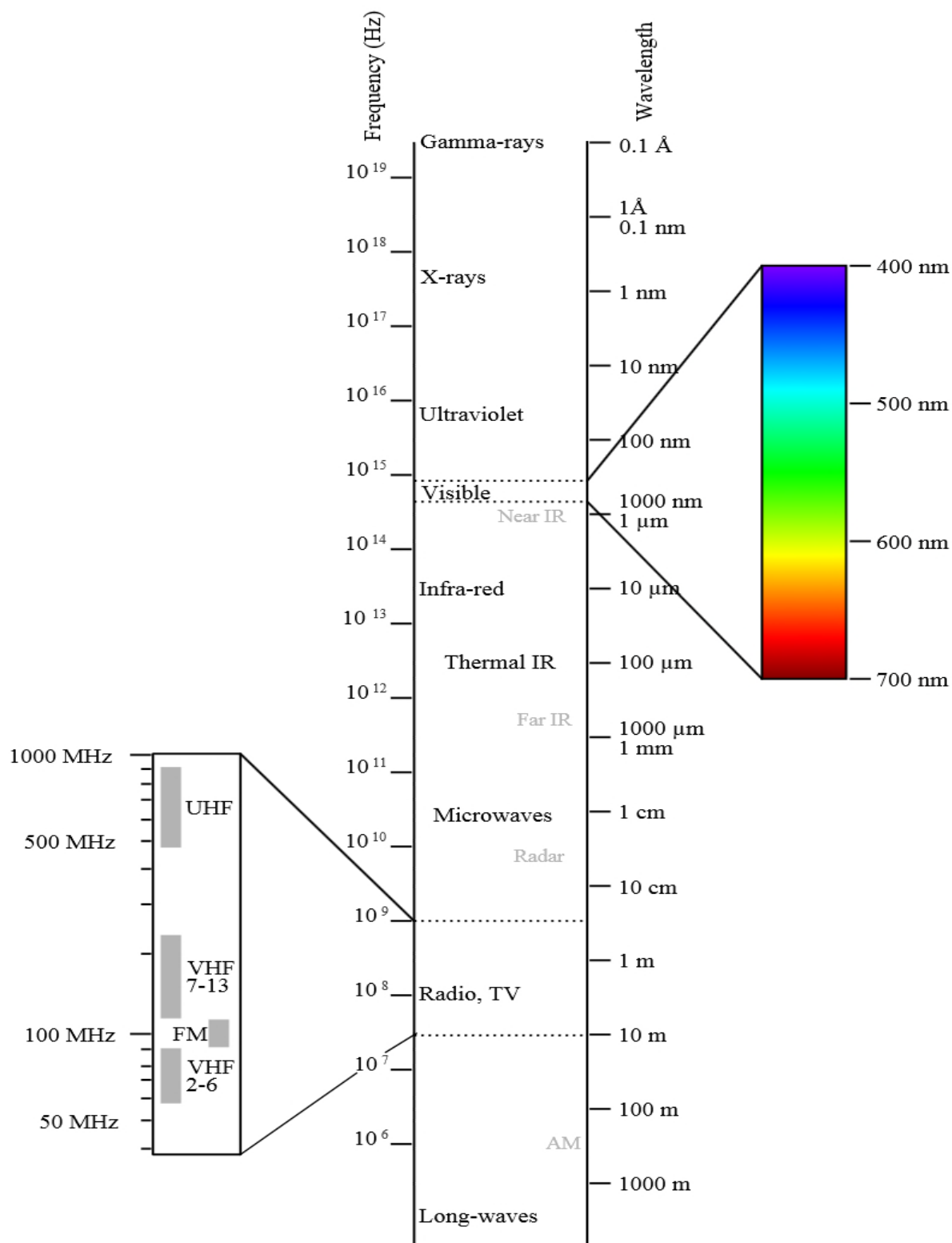
Figur 1. Instrument til måling af temperaturen ved hjælp af stråling. Inde bag det cirkulære hul nederst til højre befinder sig et optisk system, som opfanger temperaturstrålingen. Måleinstrumentet kaldes et strålingstermometer. Det virker ved at man retter den cirkulære åbning mod objektet, hvis temperatur man ønsker at måle. Målingen foretages ved at betjene kontakten i midten af billedet, og temperaturen af objektet aflæses i et display bagerst på den røde krop (displayet kan således ikke ses her).

Strålingstermometeret vist på figur 1 viser kun temperaturen af stedet man peger på. Et mere avanceret måleinstrument er strålingskameraet vist på figur 2.



Figur 2. Strålingskamera Ti25 (fabrikat Fluke) til visuel visning af både måleområdet og til punktmåling af overfladetemperaturen. I modsætning til strålingstermometeret vist ved figur 1 er strålingskameraet i stand til også at vise den flade, hvor man i udvalgte punkter kan måle temperaturen ved hjælp af stråling. Kameraet giver altså væsentlig mere information om fladen man måler på. Til gengæld er prisen væsentlig højere end for strålingstermometeret vist ved figur 1. På billedet vender kameraets display ned mod bordet og kan således ikke ses på billedet.

Anvendelsen af begge instrumenter med tilhørende fordele og ulemper belyses yderligere i T6 – Måling af temperatur ved hjælp af stråling – praktisk del [1].



Figur 3. Frekvens- og bølgelængdeinterval for den praktiske anvendelse af EM-bølger. I dette kompendie behandles bølgelængder i området fra nogle μm til flere gange $10 \mu\text{m}$ (området benævnt "Infra-red").

(By Original:PenubagVector:Victor Blacus - Own work based on: Electromagnetic-Spectrum.png, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22428451>)

2 Radiometri

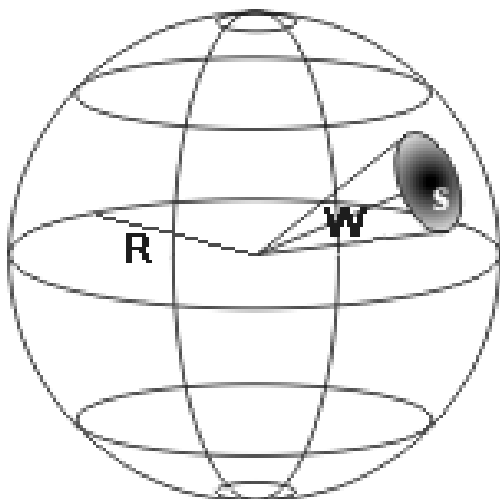
Ved radiometri forstås måling af elektromagnetisk stråling. Et legeme med arealet A og en temperatur T udstråler strålingsenergien Q . Den tilhørende strålingseffekt P er så givet ved

Ligning 1:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t},$$

hvor Δt er måletiden, som anvendes ved målingen af ΔQ . Strålingseffekten har enheden watt W, som er energi pr. tid (J/s).

Strålingseffekten P udstråles fra legemet i alle retninger. Man kan forestille sig, at man bevæger sig rundt om legemet med en strålingsmåler i en fast afstand R . Det vil svare til, at legemet befinder sig i centrum for en kugle, og strålingsmåleren med arealet S kører rundt på kugleskallen, som vist på figur 3.



Figur 4. Illustration af en strålingsmåler med arealet S , som måler på et legeme, som befinder sig i kuglens midte. Afstanden mellem måleren og legemet er R .

(CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=660383>)

På figur 4 benævnes størrelsen W som rumvinkelen, hvorunder fladen S ses fra legemet i kuglens midte.

W er defineret ved

Ligning 2:

$$W = \frac{S}{R^2}$$

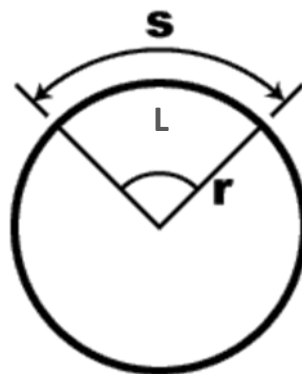
Man definerer enheden for W som *steradian* (sr). Steradian har ingen fysisk enhed, da den er dimensionsløs.

Steradian og rumvinkel?

En sædvanlig vinkel θ er defineret ved at måle buelængden L , som afskæres af vinkeludsnittet af cirklen, og dividere med cirkelns radius r . Se nedenstående formel og figur.

Enheden for θ bliver derved radian, som ikke har en fysisk enhed, idet den jo opstår ved at dividere en buelængde med en radius. θ er derved som steradian dimensionsløs.

$$\theta = \frac{L}{r}$$



Man kan således betragte rumvinkelbegrebet som en udvidelse af ovenstående vinkelbegreb. Nu er det så ikke kun længder, som indgår, men arealer (S i figur 3) og en længde R kvadreret.

For at frigøre sig fra arealet S af strålingsmåleren kan man definere strålingsstyrken I ved ligning 3, som den strålingseffekt P , som passerer ud gennem en rumvinkelenhed W .

Ligning 3:

$$I = \frac{P}{W}$$

Enheden for I er W/sr, hvor W her er enheden watt og sr er steradian

For endelig at frigøre sig fra strålingslegemets areal kan man definere radiansen L ved ligning 4, som strålingsstyrken I divideret med strålingsobjektets areal A

Ligning 4:

$$L = \frac{I}{A}$$

Enheden for radiansen L bliver $\frac{W}{m^2 \cdot sr}$, hvor den dimensionsløse enhed sr er medtaget.

Det meget væsentlige ved radiansen L er, at den er uafhængig af arealet af både strålingslegemet og strålingsmåleren. Radiansen karakteriserer således strålingens styrke i sig selv. Et analogt eksempel er f.eks. lydstyrke, som jo også er en størrelse, som er uafhængig af lydkildens areal såvel som lydmålerens areal.

Radiansen er således den fundamentale enhed til beskrivelse af stråling.

3 Termisk stråling

3.1 Definition af absorptions- og emissionsfaktor

Generelt gælder, at når elektromagnetisk stråling rammer et objekt vil noget af den indfaldende strålingen blive absorberet (trænger ind i objektet), og noget vil blive reflekteret.

I det følgende vil et objekt blive benævnt legeme, da det er den terminologi, som anvendes i forbindelse med beskrivelsen af termisk stråling. For et legeme kan man definere absorptionsfaktoren $a(\lambda)$ som forholdet mellem den absorberede og indfaldende stråling ved en bestemt bølgelængde λ .

For beskrivelsen af termisk stråling er et *absolut sort legeme* (eller en absolut sort temperaturstråler) af

fundamental betydning. Ved et absolut sort legeme forstås et objekt, som absorberer al indfaldende stråling. For dette legeme gælder altså, at $a(\lambda) = 1$ for alle bølgelængder.

Man kan i tilknytning til absorptionsfaktoren $a(\lambda)$ tilsvarende definere emissionsfaktoren $e(\lambda)$. For et absolut sort legeme er $e(\lambda) = 1$, og for alle andre legemer gælder at $0 \leq e(\lambda) < 1$. Hvis der for disse gælder at $e(\lambda)$ er konstant i et givet bølgelængdeinterval, benævnes sådanne legemer som *grå temperaturstrålere*. Bemærk, at denne betydning ikke nødvendigvis skal relateres til det, vi med øjet opfatter som farven grå.

For sammenhængen mellem $a(\lambda)$ og $e(\lambda)$ gælder

Ligning 5:

$$a(\lambda) = e(\lambda)$$

Bemærk ligning 5 gælder kun under den forudsætning, at der er tale om eksakt samme bølgelængde for både absorption og emission.

3.2 Radiansen fra et absolut sort legeme

Radiansen L_S ved bølgelængden λ fra et absolut sort legeme med temperaturen T er beskrevet ved

Ligning 6:

$$L_S = \frac{h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right)} - 1)},$$

hvor $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ J·s er Plancks konstant,

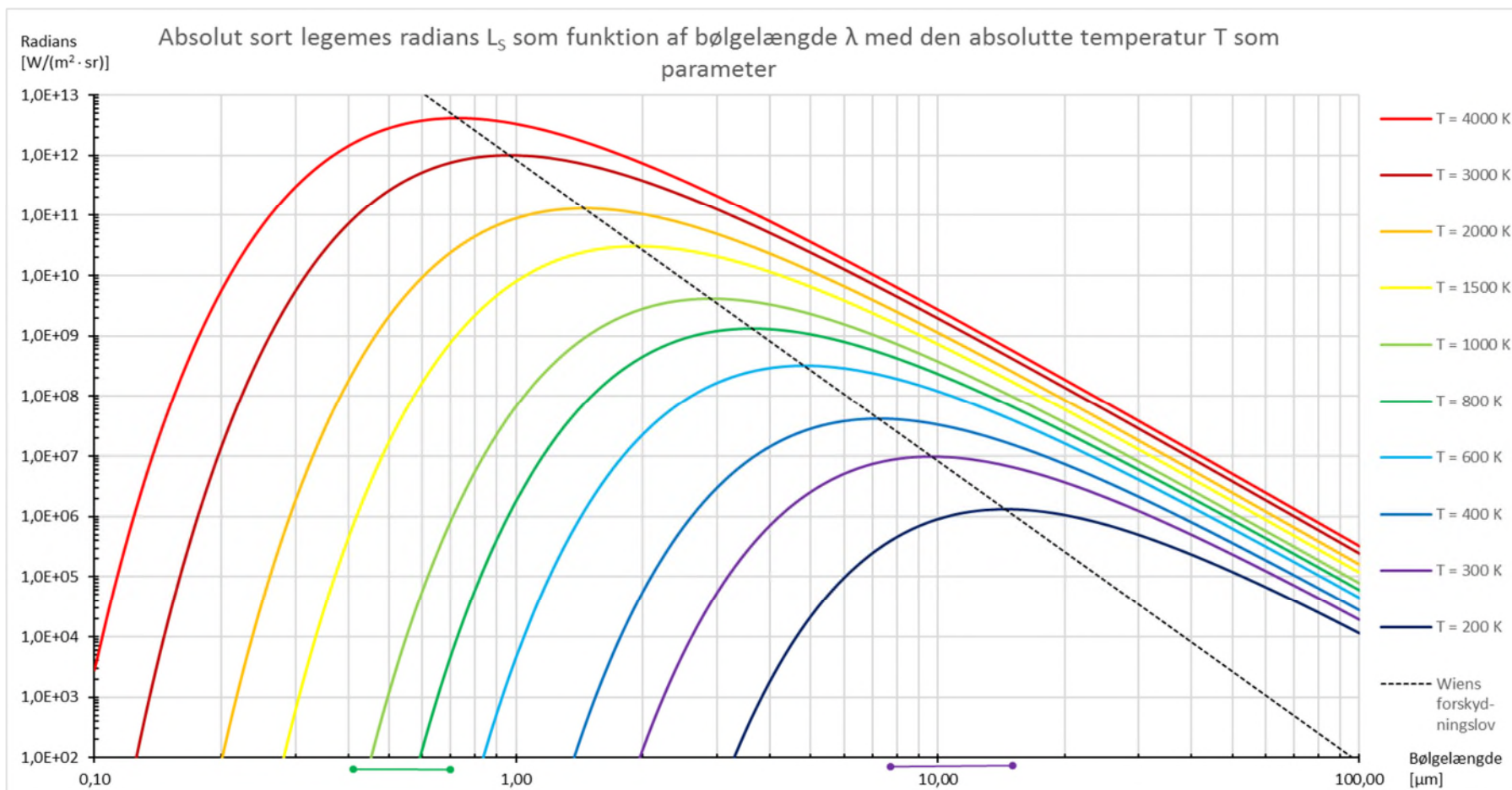
$c = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s er lysets hastighed,

$k = 1,3801 \cdot 10^{-23}$ J/K er Boltzmanns konstant,

λ er bølgelængden af strålingen med enhed m og

T er den absolutte temperatur med enhed K.

Den følgende figur 5 viser radiansen L_S som funktion af bølgelængden λ givet ved ligning 6.



Figur 5. Kurveskærer, som viser radianen L_s givet ved ligning (5) for et absolut sort legeme som funktion af bølgelængden λ med den absolutte temperatur T som parameter. Den stiplede sorte linje indikerer toppunktet for de enkelte temperaturkurver. Denne sammenhæng er kendt som Wiens forskydningslov. Det med grønt markerede område (bølglængder i intervallet 0,4 μm til 0,7 μm) repræsenterer intervallet, hvor det menneskelige øje kan registrere stråling i form af lys. Det med violet markerede område (bølglængder i intervallet 7,5 μm til 14 μm) repræsenterer intervallet, hvor det termiske kamera vist ved figur 2 kan registrere stråling.

Det kan være svært at forholde sig til de absolutte radiansværdier på ordinataksen af figur 5. Man kan dog bemærke, at for hver bølgelængde vil radiansen stige for stigende temperatur. Endvidere bemærkes, at der findes en maksimal radians for hver temperatur T af det absolutte sorte legeme. Som beskrevet under figur 5 er dette toppunkt givet ved den sammenhæng, der kendes som *Wiens forskydningslov*.

Eksempel 1: Hvis kurven for $T = 300 \text{ K} = 27 \text{ °C}$ betragtes ses, at der er maksimal radians ved bølgelængden ca. $9,5 \text{ }\mu\text{m}$. For strålingskameraet vist på figur 2 er der oplyst, at bølgelængdeintervallet, som strålingskameraet kan registrere, går fra $7,5 \text{ }\mu\text{m}$ til $14 \text{ }\mu\text{m}$. Herved måler kameraet åbenbart i et relevant og optimeret bølgelængdeinterval, når det er opgivet til at kunne fastlægge temperaturer i intervallet $-20 \text{ °C} = 253 \text{ K}$ til $+350 \text{ °C} = 623 \text{ K}$.

Eksempel 2: Temperaturen for metaltråden i en tændt halogenlødelys er ca. 3300 K , og figur 5 viser da også, at der næsten er maksimal radians i det bølgelængdeområde, hvor det menneskelige øje kan registrere stråling som lys. Det ses imidlertid også, at der udsendes meget store energimængder i de bølgelængdeområder, som det menneskelige øje ikke kan anvende til synsindtryk (men et menneske kan føle varmestrålingen).

Eksempel 3: Det menneskelige øje kan eksempelvis ikke se strålingen fra et objekt som har temperaturen $T = 600 \text{ K} = 327 \text{ °C}$, men den menneskelige krop kan tydeligt registrere strålingen som varmestråling. For et objekt, som er opvarmet til $T = 800 \text{ K} = 527 \text{ °C}$ kan det menneskelige øje begynde at ane, at objektet gløder.

Plancks geniale interpolation: Kvantefysikkens begyndelse

Fra figur 5 ses, at radiansen for hver temperatur efter toppunktet falder for stigende såvel som faldende bølgelængder.

For den faldende radians for faldende bølgelængder fandt Wien i 1894 en formelmæssig beskrivelse, som ved at justere på nogle parametre kunne passe med resultaterne fra eksperimenter. Men at radiansen efter et toppunkt skulle falde igen for længere bølgelængder, kunne Wiens arbejde ikke gøre rede for.

I 1900 kunne Raleigh-Jeans lov redegøre for radiansens faldende forløb for stigende bølgelængder, men kunne i lighed med ovenstående ikke redegøre for at radiansen skulle have et toppunkt og derefter falde for faldende bølgelængder.

Man havde således to beskrivelser for de to yderpunkter af radiansens forløb. Beskrivelsen af radiansens toppunkt manglede.

I 1900 kunne Max Planck forene Wiens og Raleigh-Jeans beskrivelser ved at sammenligne de to størrelser $h \cdot \frac{c}{\lambda}$ og $k \cdot T$. Disse størrelser indgår i eksponentialfunktionen i nævneren for ligning 6.

Planck fandt, at h måtte være en konstant, og derfor er størrelsen opkaldt efter ham.

Endvidere fandt han at strålingens radians måtte være givet ved et helt antal gange energipakker, hver med størrelsen $h \cdot \frac{c}{\lambda}$ udsendt pr. tidsenhed.

Hermed var kvantefysikken født, hvor man må erkende, at de mindste størrelser energi ikke kan udveksles kontinuert, men må udveksles i energipakker. Størrelsen af disse energipakker er dog så lille, at mennesker vil opleve udvekslingen af disse energipakker som et kontinuert forløb.

Ved Plancks arbejde kunne termisk stråling nu forklares, og resultaterne af alle udførte eksperimenter passer smukt og eksakt med hvad ligning 6 foreskriver.

3.3 Praktiske værdier for absorptions- og emissionskoefficienter

Som fremført i afsnit 3.1 gælder ligning 5

$$a(\lambda) = e(\lambda)$$

Det er imidlertid kutyme at angive en middelværdi for absorptionsfaktoren a_{middel} gældende for et bølgelængdeinterval i området for synligt lys, altså typisk i intervallet 0,4 μm til 0,7 μm . I det følgende vil dette bølgelængdeinterval blive betegnet det synlige interval. Det er sjældent, at dette bølgelængdeinterval angives, - det betragtes nærmest som indforstået.

Til gengæld angives oftest en middelværdi for emissionsfaktoren e_{middel} gældende for et bølgelængdeinterval typisk i et område omkring 7,5 μm til 14 μm . I det følgende vil dette bølgelængdeinterval blive betegnet *varmestrålingsintervallet*. Det er lige så sjældent, at dette bølgelængdeinterval angives, det betragtes også som indforstået.

Ovenstående indforståede forhold har sin oprindelse i, at absorptionsfaktoren a_{middel} har sin mest udbredte anvendelse i forbindelse med absorptionen af stråling fra solen, altså i forbindelse med dagslyset. Denne gængse opfattelse for absorptionsfaktoren kan derved direkte knyttes til, hvorledes det menneskelige øje ville vurdere absorptionen.

Den gængse mest udbredte anvendelse af emissionsfaktoren e_{middel} har sin relation til måling af stråling i form af termisk stråling, som det f.eks. foretages med kameraet vist ved figur 2.

Ovenstående indforståede forhold gør, at i diverse tabelværker kan man umiddelbart opleve, at ligning (5) ikke gælder. Ligning (5) gælder, dog under den forudsætning, at der er tale om eksakt samme bølgelængde for både absorption og emission.

Med ovenstående forhold in mente kan tabel 1 præsenteres.

Overflade	Absorptionsfaktoren a_{middel} for det synlige interval	Emissionsfaktoren e_{middel} for varmestrålingsintervallet
Aluminium, poleret	0,08	0,02
Aluminium, valset	0,2	0,05
Aluminium, elokseret klar	0,3	0,8
Aluminium, elokseret sort	0,9	0,9
Jern, blank	0,4	0,2
Jern, rusten	0,8	0,7
Kobber, blank	0,3	0,03
Kobber, oxyderet sort	0,8	0,6
Maling, hvid	0,2	0,9
Maling, sort	1,0	0,9
Plast, div. typer	0,3 – 0,9	0,9
Rustfrit stål, poleret	0,4	0,1
Rustfrit stål, sandblæst	0,6	0,3
Zink, blank	0,1	0,05
Zink, oxyderet grå	0,4	0,3

Tabel 1. Absorptionsfaktorer a_{middel} for stråling i det synlige interval og emissionsfaktorer e_{middel} for stråling i varmestrålingsintervallet. (Tabel fra ref. [3]).

Eksempel 4: Fra tabel 1 kan man bemærke, at både hvid og sort maling giver en stor emissionsfaktor i varmestralingsintervallet, mens der er stor forskel for absorptionsfaktorerne i det synlige interval. Dette belyses også i T6, ref. [1].

Eksempel 5: Det er karakteristisk, at metaloverflader, som er rene, glatte og blanke, har små værdier af både absorptions- og emissionsfaktorerne a_{middel} henholdsvis e_{middel} .

Det er væsentligt at fastslå, at termisk udstråling afspejler den termiske aktivitet, som sker på overfladen af legemet (altså lige i grænsefladen mellem det faste legeme og den omgivende luft). Den termiske stråling afspejler således udelukkende temperaturen af legemets overflade, og ikke, hvad temperaturen er inde i legemet. "Overflade" skal her virkelig forstås meget bogstaveligt, idet det drejer sig om en lagtykkelse på blot nogle få bølgelængder (altså typisk nogle få gange $10 \mu\text{m}$).

Eksempel 6: Transparente plader (f.eks. af akryl, polykarbonat eller glas) er meget lidt transparente i varmestralingsintervallet. Et eksempel på dette er vist i T6, ref. [1]. Hvis en sådan plade indskydes mellem strålingsobjektet og strålingstermometeret/-kameraet vil det pludselig blive overfladetemperaturen af pladen som måles, og ikke overfladetemperaturen af måleobjektet.

3.4 Emissionsfaktorens betydning for temperaturangivelsen

Som beskrevet i afsnit 3.2 er radiansen L_s for et absolut sort legeme givet ved ligning (6). Et sådant absolut sort legeme kan skabes under laboratorieforhold, men er ikke ligetil at skabe under almindelige forhold.

Radianzen L fra et ikke-absolut sort legeme (som f.eks. den grå temperaturstråler beskrevet i afsnit 3.1) er givet ved

Ligning 7:

$$L = e(\lambda) \cdot L_s,$$

hvor $0 \leq e(\lambda) < 1$.

Under selv de mest optimalt opnåelige forhold, kan man i praksis højst forvente at opnå en værdi for $e(\lambda)$ på 0,95.

Det vil sige, at for en given temperatur T vil et ikke-absolut sort legeme udsende en radians L , som er mindre end radiansen L_s fra et absolut sort legeme ved samme temperatur.

De i kapitel 1 viste strålingstermometer og strålingskamera måler radiansen af det objekt, som de er rettet mod. Derfra regner de "baglæns" fra ligning 6 for at finde temperaturen T .

For at kunne give visning af den korrekte temperatur T er det derfor nødvendigt for strålingstermometeret/-kameraet at kende $e(\lambda)$ for fladen som betragtes.

Som det vises i T6, ref. [1] kan man opnå, at man rammer en værdi for $e(\lambda)$ tæt på 0,95 ved f.eks. at påklæbe "englehud" på fladen.

Strålingstermometeret/-kameraet anvender derfor værdien 0,95 for $e(\lambda)$, når det udregner T ud fra den målte radians.

For de forskellige typer og fabrikater af strålingstermometeret/-kameraet er det ikke altid muligt at ændre den værdi af $e(\lambda)$, som benyttes til temperaturberegningerne. For strålingstermometeret vist ved figur 1 kan værdien for $e(\lambda) = 0,95$ f.eks. ikke ændres, mens det er en mulighed for strålingskameraet vist ved figur 2.

Sædvanligvis er $e(\lambda) = 0,95$ den mest benyttede, men hvad betyder det for temperaturangivelsen, hvis $e(\lambda)$ utilsigtet viser sig at have en anden værdi end 0,95?

Ved at anvende de regneark, som ligger til grund for figur 5 på "den baglæns måde", kan man for et simpelt termisk strålingstermometer bestemme fejlvisningen for T , hvis termometeret anvender værdien 0,95 for $e(\lambda)$, og $e(\lambda)$ faktisk antager andre værdier.

I modsætning til "den baglæns måde" er "den forlæns måde" beregning af radiansværdierne L_s via ligning (6) for stigende værdier af bølgelængden λ i intervallet $0,1 \mu\text{m}$ til $100 \mu\text{m}$, mens temperaturen T fastholdes. Det er ved anvendelse af "den forlæns måde", at figur 5 fremkommer. Et udsnit af disse beregninger er vist ved tabel 2.

λ [μm]	λ [m]	T [K]	Ls 200 [W/(m ² · sr)]	T [K]	Ls 300 [W/(m ² · sr)]	T [K]
0,10	1,00E-07	200	#NUM!	300	6,14E-190	400
0,11	1,10E-07	200	6,92E-266	300	3,29E-171	400
0,12	1,20E-07	200	2,09E-242	300	1,28E-155	400
0,13	1,30E-07	200	1,49E-222	300	1,93E-142	400
0,14	1,40E-07	200	1,51E-205	300	3,70E-131	400
0,15	1,50E-07	200	8,09E-191	300	2,17E-121	400
0,16	1,60E-07	200	6,11E-178	300	7,51E-113	400
0,17	1,70E-07	200	1,38E-166	300	2,52E-105	400
0,18	1,80E-07	200	1,68E-156	300	1,21E-98	400
0,19	1,90E-07	200	1,76E-147	300	1,14E-92	400
0,20	2,00E-07	200	2,27E-139	300	2,67E-87	400
0,21	2,10E-07	200	4,87E-132	300	1,91E-82	400
0,22	2,20E-07	200	2,24E-125	300	4,87E-78	400
0,23	2,30E-07	200	2,68E-119	300	5,10E-74	400
0,24	2,40E-07	200	9,89E-114	300	2,45E-70	400
0,25	2,50E-07	200	1,30E-108	300	5,90E-67	400
0,26	2,60E-07	200	6,84E-104	300	7,77E-64	400
0,27	2,70E-07	200	1,60E-99	300	5,96E-61	400
0,28	2,80E-07	200	1,81E-95	300	2,83E-58	400
0,29	2,90E-07	200	1,07E-91	300	8,72E-56	400
0,30	3,00E-07	200	3,52E-88	300	1,82E-53	400

Tabel 2. Udsnit af regnearket, som ligger til grund for figur 5. Yderst til venstre (søjle 1, orange farve) ses den voksende bølgelængde λ startende med værdien 0,10 μm . Søjle 3 fra venstre (gul farve) viser den fastholdte temperatur $T = 200$ K, og søjle 4 (blå farve) viser den tilhørende radian L_{s200} . Herefter forøges T til 300 K (søjle 5 fra venstre, lysegrøn farve) med tilhørende værdier af L_{s300} (søjle 6 fra venstre, mørkegrøn farve). På denne måde opnås alle kurveskarer i figur 5.

Ved "den baglæns måde" fastholdes en værdi for bølgelængden λ , mens temperaturen T gøres stigende indtil den ønskede værdi af radianen opnås. Tabel 3 viser et udsnit af det regneark, som anvendes ved "den baglæns måde".

λ [μm]	λ [m]	T [K]	Ls (298,15 K) [W/(m ² · sr)]	e(λ)-forhold 0,75 / 0,95	Lgrundlag [W/(m ² · sr)]
10,75	1,08E-05	298,15	9,4239E+06	0,7895	7,44E+06
10,75	1,08E-05	283,0	7,3928E+06		
10,75	1,08E-05	283,1	7,4053E+06		
10,75	1,08E-05	283,2	7,4177E+06		
10,75	1,08E-05	283,3	7,4302E+06		
10,75	1,08E-05	283,4	7,44E+06		
10,75	1,08E-05	283,5	7,4553E+06		
10,75	1,08E-05	283,6	7,4678E+06		
10,75	1,08E-05	283,7	7,4804E+06		
10,75	1,08E-05	283,8	7,4929E+06		
10,75	1,08E-05	283,9	7,5055E+06		
10,75	1,08E-05	284,0	7,5181E+06		

Tabel 3. Udsnit af det regneark, som ligger til grund for den "baglæns måde". Anvendelsen af regnearket er forklaret ved eksempel 7.

Eksempel 7 (fortsættes hele spalten ned): For det her forsimplede tilfælde antages, at strålingstermometeret måler radianen ved bølgelængden $\lambda = 10,75$ μm . Denne værdi er midtpunktet for bølgelængdeintervallet fra 7,5 μm til 14 μm , som er oplyst at være det målingsinterval, som strålingskameraet vist ved figur 2 anvender.

Det antages nu, at strålingskameraet viser den korrekte temperatur 25 °C ($T = 298,15$ K) for et legeme med $e(\lambda) = 0,95$.

For radianen fra et absolut sort legeme med $\lambda = 10,75$ μm , $T = 298,15$ K og $e(\lambda) = 1$ fås fra ligning 6

$$L_s(10,75 \mu\text{m}; 298,15 \text{ K}; 1) = 9,4239 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$

Denne værdi er i tabel 3 vist i øverste række i søjle 4 fra venstre.

For et legeme med $e(\lambda) = 0,95$ fås radianen

$$L_{0,95} = 0,95 \cdot L_s = 8,9527 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$

$L_{0,95}$ er radianen som instrumentet faktisk måler, og instrumentet "er blevet fortalt" at $e(\lambda) = 0,95$. Nu tager instrumentet den målte radian $L_{0,95}$ og dividerer med 0,95. Hermed fås værdien L_s , som instrumentet opfatter som radianen fra et absolut sort legeme, og beregner T ved at "regne baglæns" ud fra ligning 6.

Hvis nu $e(\lambda)$ faktisk er mindre end 0,95, f.eks. 0,75, vil den radian, som instrumentet faktisk måler være

$$L_{0,75} = 0,75 \cdot L_s = 7,0679 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$

Instrumentet vil tage denne værdi og fejlagtigt systematisk dividere med 0,95. Hermed fås værdien

$$L_{\text{grundlag}} = 7,0679 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}} / 0,95 = 7,44 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$

Denne værdi er den værdi, som instrumentet "tror" skal anvendes til at "regne baglæns" for at finde temperaturen. Værdien $7,44 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$ findes i tabel 3, sidste søjle, øverste række (lyseblå farve).

Denne "baglæns beregning" er foretaget i tabel 3, 4. søjle fra venstre, 6. række fra oven (lysegrøn farve). Instrumentet vil herved vise temperaturen $T = 283$ K = 10 °C (orange farve) i stedet for den korrekte temperatur 298 K = 25 °C.

Den følgende tabel 4 viser disse målemæssige og systematiske fejleregninger. Eksempel 7 slut.

Faktisk $e(\lambda)$	Fejlregningsfaktor	Den beregnede absolutte temperatur [K]	Temperaturen vist på displayet [°C]
0,95	$\frac{0,95}{0,95} (= 1)$	298	25
0,90	$\frac{0,90}{0,95}$	295	22
0,85	$\frac{0,85}{0,95}$	291	18
0,80	$\frac{0,80}{0,95}$	287	14
0,75	$\frac{0,75}{0,95}$	283	10

Tabel 4. Temperaturen i °C, som et simpelt strålingstermometer vil udvise, hvis den faktiske værdi for $e(\lambda)$ er forskellig fra 0,95 (strålingstermometeret "tror", at $e(\lambda)$ er lig med 0,95).

Tabel 4 afslører tydeligt, at det er af stor vigtighed at kunne sætte korrekt værdi for $e(\lambda)$.

Der er dog en mekanisme, om gør, at fejlvisningen grundet forkert sat værdi af $e(\lambda)$, ofte ikke antager så store værdier, som vist i tabel 4. Denne mekanisme er dog meget uforudsigelig.

Mekanismen beror på, at en mindre værdi for emissionsfaktoren $e(\lambda)$ sædvanligvis optræder sammen med en større værdi for refleksionsfaktoren for det legeme, som måles på. Dette gælder specielt for blanke overflader.

Som også belyst i T6, ref. [1] vil omgivelserne også afgive termisk stråling, simpelthen fordi omgivelserne også har en temperatur større end 0 K. Ofte vil det endog forholde sig sådan, at omgivelsernes temperatur er sammenlignelig med temperaturen af de legemer som måles på. Hermed vil strålingstermometeret/-kameraet modtage en del af omgivelsernes stråling i form af den stråling, som reflekteres af legemet. Denne stråling vil adderes til selve udstrålingen fra legemet, og derved modvirke at temperaturvisningen bliver for lav.

Som ovenfor anført, er denne mekanisme meget uforudsigelig, idet den fordrer kendskab til både omgivelsernes temperatur og refleksionsfaktoren for legemet.

4 Fordele og ulemper ved temperaturmåling via stråling

Den umiddelbare store fordel ved at anvende et strålingstermometer/-kamera er den berøringsfrie temperatúraftastning. Hermed er det særdeles hurtigt og bekvemt at foretage temperaturmålinger.

Den største ulempe ved denne form for temperaturmåling er at $\epsilon(\lambda)$ skal kendes for den betragtede overflade. Ellers kan der blive tale om store usikkerheder for temperaturangivelsen.

Endvidere skal man altid huske på, at det er overfladetemperaturen, som måles. Ved at anvende et strålingstermometer vil man altså ikke få oplysning om temperaturen inde i emnet. Som nævnt i afsnit 3.3 skal overfladetemperaturen skal her virkelig forstås meget bogstaveligt, idet det drejer sig om en lagtykkelse på blot nogle få bølgelængder (altså typisk nogle få gange $10 \mu\text{m}$). Dette kan være f.eks. være af stor betydning ved måling af levnedsmidler, som skal opbevares under en given temperatur.

Endvidere skal man også tage sig i agt for, at man utilsigtet kan komme til at måle temperaturen af en overflade, som befinder sig mellem strålingstermometeret og den betragtede overflade. Dette er vist ved at indskyde en, for øjet gennemsigtig, akrylplade i T6, ref. [1]. Hermed måles lige pludselig temperaturen af akrylpladens overflade, og ikke det emne, som øjet ser.

Som med alting skal man "blot" kende ulemperne for at undgå eller kompensere for dem, og måling af temperatur ved stråling er en særdeles effektiv temperaturmålingsmetode. At "blot" er sat i anførelses-tegn dækker over, at der kan være sin store sag at opnå kendskabet til ulemperne og herudover kunne vurdere størrelsen af disse.

5 Referencer og litteraturhenvisning

General reference: T. Skettrup, Optoelektronik, Polyteknisk Forlag, 1993.

- [1] T6 – Måling af temperatur ved hjælp af stråling, praktisk del – video, 2017. Kan efter registrering hentes gratis på hjemmesiden www.metrologi.dk
- [2] Stephen Gasiorowics, Quantum Physics, John Wiley & Sons, 1974.
- [3] Kursusmateriale, Termisk rigtig apparatkonstruktion, DELTA.

6 Forudsætninger m.m.

6.1 Om dette UE

Strukturen af dette UE er således, at der indledes med fundamentale begreber vedrørende radiometri (måling af stråling). Dernæst introduceres begrebet stråling fra et legeme (termisk stråling), og der afsluttes med nogle mere praktisk relaterede begreber, som hvad forskelle i absorption og emission betyder for målingerne. Den teoretiske del i dette UE danner et udbyggende grundlag for de praktiske målinger vist ved "T6 – Måling af temperatur ved hjælp af stråling, praktisk del – video", ref. [1].

6.2 Læringsudbytte

Efter tilegnelse af det følgende materiale vil læseren have opnået følgende læringsudbytte:

- Kendskab til hvad radiometri er.
- Kendskab til de begreber, der knyttes til radiometri.
- Kendskab til beskrivelsen af stråling fra et legeme (termisk strålingen).
- Kendskab til hvad absorption og emission er.
- Kendskab til hvad forskelle i emission betyder for temperaturmålingen.

6.3 Forudsætninger

Det forudsættes, at

- Læseren er bekendt med eksponentialfunktionen fra matematikken.
- Læseren har gennemset "T6 – Måling af temperatur ved hjælp af stråling, praktisk del – video". Ref. [1].