



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Kartlegging av transmittansen til dekkglass type PC 2610-4 fra Rodeca til bruk på solfangere

Mapping of the transmittance of glazing PC 2610-4
for solar collector use

Erik Heggelund
Miljøfysikk og fornybar energi

Denne siden er blank med hensikt.

Forord

Sommeren 2018 oppsøkte jeg Petter H. Heyerdahl for å forhøre meg om mulige masteroppgaver med han som veileder. Petter fortalte om flere spennende prosjekter, blant annet om solfangeranlegget som er i ferd med å utvikles her på NMBU, og problemstillingene knyttet til dets drift. Dette kom til å bli spennende, sa han. Jeg stolte på han, og han fikk rett.

Denne oppgaven markerer slutten på mitt studie av Fornybar Energi og Miljøfysikk her ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet.

Jeg vil takke min veileder Petter H. Heyerdahl for mange gode diskusjoner om transmittans, dekkglass og solfangere generelt. Petter har tatt seg god tid til å svare på mine lange lister med spørsmål, når enn det skulle trenge. I tillegg har han gitt meg mye kunnskap om hvordan en solfanger fungerer, og hvilke problemer som er knyttet til utvikling av et solfangeranlegg. Petter har også lært meg hva *blåbær*, *en lars* og *en lefse* er.

I tillegg vil jeg takke Tom Ringstad for å la meg jobbe på labben og for å gi praktisk hjelp, og Wilhelm Huus-Hansen for å være tilgjengelig for spørsmål.

Videre vil jeg takke min kjæreste Sofie, min far Espen, Åshild og Gudmund Reidar for gjennomlesning av og tilbakemeldinger på oppgaven. Jeg vil også takke kantine mannen på TF for hyggelige samtaler i de mange cookie-pausene som har vært.

Sist, men ikke minst, vil jeg takke min familie for støtte under masterarbeidet, og ellers i livet.

Erik Heggelund
Ås, 12. mai 2019

Sammendrag

Verdens energibruk øker stadig. Omtrent 40% av verdens energibruk kommer fra bygningssektoren. I Norge går omtrent 75% av strømbruken i en gjennomsnittlig husholdning med til oppvarming av bygningen. Det er derfor av interesse å finne alternative måter å varme opp bygninger på.

Det er mulig å dekke en gjennomsnittlig norsk husholdnings varmebehov ved hjelp av solfangere kombinert med varmebrønner i bakken. En solfanger er en spesiell type varmeveksler som omgjør innstrålt solenergi til nyttig varmeenergi, med en viss virkingsgrad.

Det er ønskelig at en solfanger har høy virkingsgrad, for å få sanket så mye energi som mulig. En viktig faktor av en solfangers totale virkingsgrad, er transmittansen til dekkglasset benyttet på solfangeren.

Ved det Norske Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU) er et bygnings-integrert solfangeranlegg i ferd med å utvikles. Dekkglassprodusenten Rodeca har anbefalt et bestemt dekkglass til solfangeranlegget. Transmittansen til dette dekkglasset er ikke tidligere grundig undersøkt.

Denne oppgavens formål er å kartlegge transmittansen til dekkglasset anbefalt av Rodeca til solfangeranlegget som er under utvikling ved NMBU. Dette er gjort ved å måle dekkglassets transmittans ved innstråling med ulike innfallsvinkler, i ulike situasjoner. Laboppsettet brukt for å måle dekkglassets transmittans besto av lyspærer montert inne i en lysboks, dekkglasset, og et pyranometer for å måle transmittansen som passerer dekkglasset.

Målemetoden benyttet i denne oppgaven medførte en del usikkerheter, særlig som følge av spredning av stråling fra dekkglasset, og transmittansens avhengighet av bølgelengden på strålingen.

Resultatene viser at dekkglassets transmittans har en verdi mellom 0,60 og 0,70. Transmittansen funnet i denne oppgaven er dermed relativt lav.

Dekkglassets transmittans synker med økende azimutvinkelforskjell og høydevinkel-forskjell mellom dekkglasset og innstrålingen. Transmittansen synker raskere med økt azimutvinkel enn med økt høydevinkel som følge av dekkglassets oppbygging. Som følge av dette anbefales dekkglasset å monteres med vertikale skillevegger hvis det skal benyttes på et solfangeranlegg langt nord, som for eksempel i Norge.

Før det kan konkluderes at dekkglasset fra Rodeca burde benyttes i et solfangeranlegg eller ikke, burde strålingstap og konveksjonstap gjennom dekkglasset undersøkes.

Abstract

The world's energy use is rapidly growing. About 40% of the world's energy use, comes from the building sector. In Norway, on average about 75% of the electricity consumption of a household, is used to warm the building. It is therefore of interest to find alternative methods for heating buildings.

It is possible to provide enough heat to an average norwegian household with a solar collector combined with a borehole thermal energy system (BTES). A solar collector is a special kind of heat exchanger, that absorbs energy from the solar radiation and delivers energy in the form of heat.

It is desired that a solar collector's efficiency is as high as possible, in order to collect the most energy. An important part of a solar collector's total efficiency, is the transmittance of the solar collector's glazing.

A building integrated solar collector system is under development at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU). Rodeca, a manufacturer of glazings, has recommended one particular glazing for the solar collector system. The transmittance of this glazing has not yet thoroughly been studied.

The objective of this project is to map the transmittance of the glazing suggested by Rodeca for the solar collector system at NMBU. This was done by measuring the glazing's transmittance with radiation from different incident angles, in different situations. The lab equipment used to measure the transmittance consisted of a radiation box, a pyranometer and the glazing.

The method used in this project brought up a lot of uncertainties, in particular regarding the scattering of the radiation from the glazing, and the wavelength distribution of the radiation.

The results show that the transmittance of the glazing has a value between 0.60 and 0.70. Thus, the transmittance found in this project is relatively low.

The transmittance of the glazing is decreasing with increasing radiation incident angle. The transmittance is decreasing more rapidly with increasing azimuth angle

than increasing altitude angle, as a result of the glazing's structure. Because of this it is advised to mount the glazing with vertical slats, if it is going to be used in a solar collector system in the north, for example in Norway.

Before it is possible to conclude if the glazing from Rodeca should be used in a solar collector system, the radiation losses and the convection losses through the glazing should be studied.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Bygningsintegreerte solfangere	1
1.3	Problemstilling	2
2	Teori	5
2.1	Strålingsfysikk	5
2.2	Flatplatesolfangere	8
2.2.1	Tap fra en flatplatesolfanger	10
2.2.2	Nyttig effekt fra en flatplatesolfanger	11
2.3	Dekkglassets optikk	14
2.3.1	Snells brytningslov	14
2.3.2	Dekkglassets transmittans	14
2.3.3	Diffus og bakke-reflektert stråling	25
2.3.4	Absorbert energi, S	27
3	Metode	29
3.1	Utstyr	29
3.2	Kilder til feil, usikkerhet	35
3.3	Kartlegging av transmittans	36
3.3.1	Transmittans ved varierende azimutvinkel, <i>forsøk 1</i> og <i>forsøk 2</i>	36
3.3.2	Transmittans ved varierende lystemperatur	38
3.3.3	Transmittans ved varierende azimutvinkel og pyranometer parallelt med dekkglass: <i>forsøk 4</i>	39
3.3.4	Transmittans ved varierende høydevinkel, <i>forsøk 5</i>	41
3.4	Transmittans ved målinger utendørs	42
3.4.1	Beskrivelse av oppsett	42
3.4.2	Transmittans ved varierende azimutvinkel og høyde-vinkel: <i>forsøk 9</i> og <i>forsøk 10</i>	42

3.4.3	Diffus stråling	44
3.5	Nye forsøk av transmittans	44
3.5.1	Transmittans ved varierende azimutvinkler: <i>forsøk 11, 12.1</i> og <i>12.2</i>	45
3.5.2	Transmittans ved varierende lystemperatur: <i>forsøk 13.1</i> og <i>13.2</i>	46
3.5.3	Variasjon av målt transmittans som følge av avstanden mel- lom dekkglass og pyranometer, <i>forsøk 14</i> og <i>forsøk 15</i>	46
4	Resultater	49
4.1	Dekkglassets transmittans	49
4.1.1	Transmittans ved <i>forsøk 1</i> og <i>forsøk 11</i>	49
4.1.2	Transmittans ved <i>forsøk 2</i> og <i>forsøk 12.2</i>	52
4.1.3	Transmittansberegningers avhengighet av dekkglassets av- stand fra pyranometeret, <i>forsøk 14</i> og <i>forsøk 15</i>	53
4.1.4	Transmittans ved <i>forsøk 12.1</i> og <i>forsøk 12.2</i>	53
4.1.5	Transmittans ved <i>forsøk 11</i> sammenlignet med transmittans ved <i>forsøk 12.1</i>	56
4.1.6	Transmittans ved <i>forsøk 4</i>	58
4.1.7	Transmittans ved <i>forsøk 5</i>	58
4.1.8	Transmittans ved varierende lystemperatur: <i>forsøk 3, 13.1</i> og <i>13.2</i>	61
4.2	Transmittans målt utendørs, <i>forsøk 9</i> og <i>10</i>	63
5	Diskusjon	65
5.1	Diskusjon av målte transmittanskurver	65
5.1.1	Spredning av stråling	65
5.1.2	Målt transmittans ved ulike lystemperaturer	69
5.1.3	Transmittans målt utendørs	70
5.1.4	Målte transmittanskurver sammenlignet med teoretisk trans- mittanskurve.	71
5.2	Usikkerhet ved målinger	72
5.3	Dekkglasset som en del av en solfangermodul	73
5.3.1	Tap fra en solfanger	73
5.3.2	Orientering av dekkglasset	74
5.4	Videre arbeid og anbefalinger	76
5.4.1	Forbedring av målemetode	76
5.4.2	Måling av strålings- og konveksjonstap gjennom dekkglasset	78
5.4.3	Matematisk undersøkelse av energisanking	78
5.4.4	Valg av dekkglass	78

6	Konklusjon	81
6.1	Målt transmittans	81
6.2	Målemetode	82
6.3	Optiske tap, sammenlignet med andre tap	82

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Energiforbruket på jorden vokser stadig. Fra 1984 til 2004 fant en økning på 49% av verdens energibruk sted [1]. Omtrent 20% til 40% av verdens energiforbruk kommer fra bygningssektoren [1]. Bygningssektoren står dermed for en større energibruk enn både transport- og industrisektoren [1].

I Norge går omtrent 75% av en husholdnings strømforbruk til romoppvarming og oppvarming av vann [2]. Dette tilsvarer omtrent 20000 kWh i gjennomsnitt per enebolig per år [3]. Ved *Drake Solar Community* i Drake Landing i Cananda varmes en hel bydel opp av solvarme ved hjelp av solfangere og sesonglagring av varme i bakken [4]. Dette viser at det er mulig å varme opp eneboliger, nesten ene og alene ved hjelp av solfangere kombinert med sesonglagring av varme.

En solfanger fungerer ved å absorbere energi fra solstrålingen, og deretter levere deler av denne energien som varme der det er varmebehov. Ved bruk av solfangerer til oppvarming av bygninger er det ønskelig at solfangerens virkningsgrad er så høy som mulig. En viktig faktor i en solfangers totale virkningsgrad er dekkglasset på en solfanger sin transmittans. Dekkglassets transmittans bestemmer hvor stor andel av den innkommende strålingseffekten som når solfangerens absorbatore.

1.2 Bygningsintegreerte solfangere

Her ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU) drives utvikling av en bygningsintegreert flatplatesolfanger der tanken er at absorbatoren skal væ-

re integrert i en bygning, for eksempel på et tak, og dekkglasset skal monteres over absorbatoren som takets dekke. I en slik situasjon kan dekkglasset monteres over solfangerens absorlator, uavhengig av stykkestørrelsen på absorbatoren. Ved montering av en slik solfanger på et tak, vil det stilles visse krav til solfangerens dekkglass, slik at dekkglasset kan fungere som et gyldig takdekke.

Rodeca er en produsent av dekkglass, og har anbefalt dekkglass type PC 2610-4 som dekkglass på solfangerne i utvikling ved NMBU. Begrunnelsen til bruken av akkurat dette dekkglasset, er dets gode egenskaper ved sammenkoblingsmekanismen mellom dekkglass. Dette dekkglasset er laget slik at det er liten sannsynlighet for at vann lekker igjennom der ett dekkglass er koblet sammen med det neste i rekken. Dette dekkglasset er derfor et godkjent takdekke etter norske standarder. [5]

En annen grunn til at dekkglasset produsert av Rodeca er ønsket ved bygningsintegrerte solfangere, er at flere dekkglass som er koblet sammen ser ut som én enkelt flate. Dette er ofte ønskelig fra et arkitektonisk perspektiv. [5]

1.3 Problemstilling

Hensikten med denne oppgaven er å kartlegge transmittansen til dekkglasset anbefalt av Rodeca. Dette er ikke gjort før, og resultatet av kartleggingen vil si noe om potensiale til sankning av energi fra solfangere som benytter dette dekkglasset. Transmittansen til dekkglasset vil sette en øvre grense på virkningsgraden til solfangeranlegget.

Tidligere undersøkelser av transmittansen til dekkglass som kan brukes på solfangere, viser blant annet at en transmittans på opp til 0,90 kan oppnås ved å benytte glass med lavt jerninnhold [6]. Dette glasset vil ha en høy transmittans for kortbølget stråling, men meget lav transmittans for lavbølget stråling [6]. Tomáš Matuška ved *Faculty of Mechanical Engineering CTU* i Praha, bruker en antatt transmittans 0,91 i sin undersøkelse av tapsmekanismer fra en solfanger [7]. Volker Quaschnig, professor i fornybar energi ved *Hochschule für Technik und Wirtschaft* i Berlin, antar en typisk transmittans for solfangere på omtrent 0,82 [8].

En metode for å undersøke transmittansen til et dekkglass er utviklet av denne oppgavens veileder Petter H. Heyerdahl. Transmittansen til et dekkglass er ikke tidligere grundig målt ved hjelp av laboppsettet benyttet i denne oppgaven. Det er derfor av interesse om metoden benyttet er en god metode for å måle transmittans.

Følgende to spørsmål ønskes besvart i denne oppgaven:

1. Hva er dekkglassets transmittans, og hvordan endrer den seg med økt azimutvinkelforskjell og økt høydevinkelforskjell mellom dekkglasset og solinnstrålingen?
2. Er metoden benyttet i denne oppgaven til å finne dekkglassets transmittans en god metode?

Kapittel 2

Teori

All teori i dette kapitlet er hentet fra *Solar Engineering of Thermal Processes. Third edition, J. Duffie et al. (2006)* [9], der annet ikke er nevnt.

2.1 Strålingsfysikk

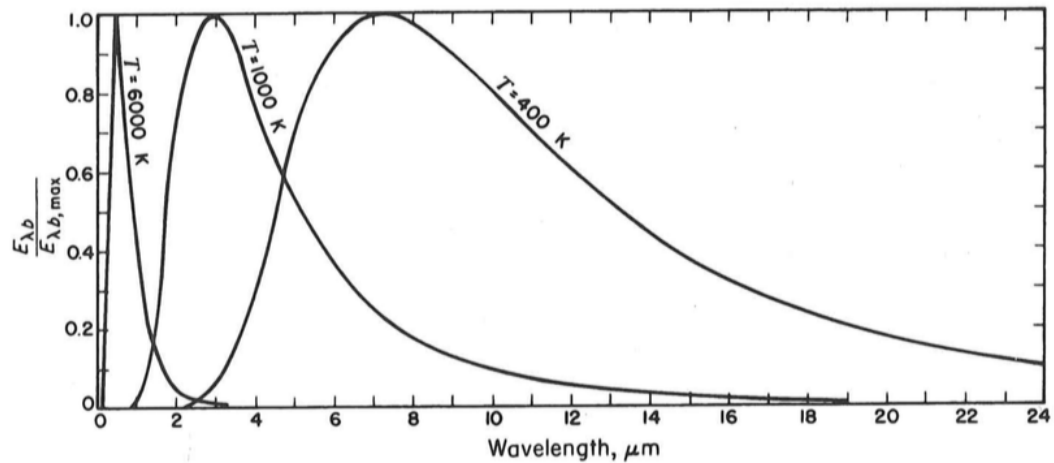
Legemers utstråling

Alle legemer med en absolutt temperatur $T > 0$ K emitterer elektromagnetisk stråling. Strålingen skyldes at atomer, molekyler eller elektroner i legemer eksiteres til et høyere energinivå, og deretter returnerer til sitt opprinnelige energinivå ved å sende ut energi som elektromagnetisk stråling. Eksitasjonen kan følge av legemets indre energi, eller av absorpsjon av strålingsenergi fra omgivelsene.

Svarte legemer og Plancks lov

Et svart legeme er et legeme som absorberer all innkommende stråling. Det vil si at svarte legemer har en absorptans $\alpha = 1$. Et svart legeme utstråler også den maksimale mulige utstrålingsenergien. Det vil si at svarte legemer har en emittans $\varepsilon = \alpha = 1$.

Et svart legeme utstråler i et spekter av bølglengder, der bølglengdefordelingen til strålingen er gitt av Plancks lov, vist i ligning 2.1,



Figur 2.1: Figuren viser bølglengdefordelingen til svarte legemer ved temperaturene $T = 6000 \text{ K}$, $T = 1000 \text{ K}$ og $T = 400 \text{ K}$. Plottets x -akse er bølglengden (wavelength) til strålingen utstrålt fra det svarte legemet. Plottets y -akse ($E_{\lambda b}/E_{\lambda b, \max}$) viser hvor stor intensiteten utstrålt ved en bølglengde λ er, i forhold til hvor stor intensiteten er til den bølglengden som utstråles med høyest intensitet λ_{\max} . Gjengitt med tillatelse fra *Solar Engineering of Thermal Processes. Third edition, J. Duffie et al. (2006) [9]*.

$$E_{\lambda b} = \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc_0}{\lambda k T}} - 1)} \quad (2.1)$$

hvor $E_{\lambda b}$ er intensiteten et svart legeme utstråler av elektromagnetisk stråling med bølglengden λ , h Plancks konstant, k er Boltzmanns konstant, C_0 er lysets hastighet i vakuum og T er det svarte legemets absolute temperatur. Figur 2.1 viser bølglengdefordelingen til tre svarte legemer, et på $T = 6000 \text{ K}$, et på $T = 1000 \text{ K}$, og et på $T = 400 \text{ K}$.

Wiens Forskyvningslov

Alle svarte legemer har en bestemt bølglengde de utstråler med større intensitet enn alle andre bølglengder. Denne bølglengden korresponderer med Planckkurvens toppunkt. Hvor denne bølglengden ligger i det elektromagnetiske spekteret indikerer hvordan et svart legemes bølglengdefordeling ser ut. Bølglengden som utstråles med størst intensitet er gitt ved Wiens forskyvningslov, vist i ligning 2.2.

$$\lambda_{max}T = 2897,8 \mu\text{m K} \quad (2.2)$$

Her er λ_{max} bølgelengden som korresponderer med Planck-kurvens toppunkt og T legemets absolutte temperatur.

Stefan Boltzmanns lov

Effekten som et legeme med en emittans på ε og en temperatur på T utstråler er gitt ved stefan Boltzmanns lov, vist i ligning 2.3,

$$Q_{str} = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.3)$$

der Q_{str} er den utstrålte energien fra et legeme med temperatur T og emittans ε , og σ er Stefan Boltzmanns konstant. For svarte legemer er $\varepsilon = 1$. Stefan Boltzmanns lov er funnet ved å integrere Plancks lov for alle bølgelengder λ og å multiplisere med emittansen ε . Ligning 2.3 viser at et legemes utstrålte energi er sterkt avhengig av dets temperatur T , grunnet at temperaturen er opphøyd i fjerde potens.

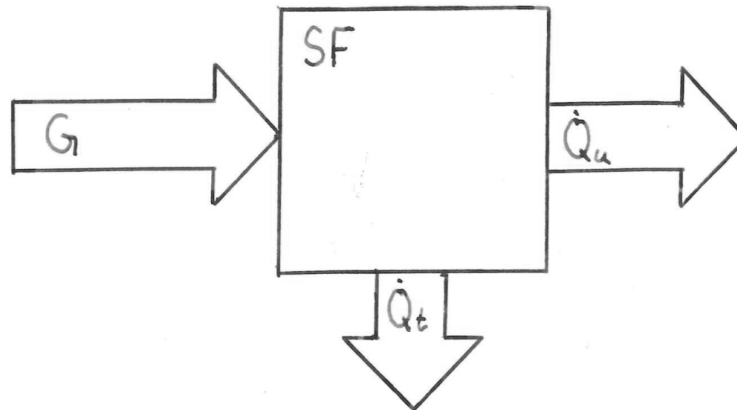
Lystemperatur

Wiens forskyvningslov leder til begrepet lystemperatur (engelsk: Color temperature). Lystemperatur er et begrep som brukes for å beskrive bølgelengdefordelingen (fargen) til lys, for eksempel i optikk-industrien [10]. Begrepet brukes som oftest om lyskilder som ligner svarte legemer, altså brukes ikke begrepet om for eksempel monokromatisk¹ lys. En lyskilde som har en lystemperatur på T , utstråler med omtrent samme bølgelengdefordeling som et svart legeme med temperaturen T gjør. Et legeme med lystemperaturen T trenger dog ikke være et svart legeme, eller å ha den absolutte temperaturen T .

Solstråling

Sola er et tilnærmet svart legeme. Det vil si at solas utstråling har en bølgelengdefordeling tilnærmet lik Planck-kurven ved solas overflatetemperatur. Solas effektive overflatetemperatur er omtrent $T_s = 6000$ K [11]. Kurven for temperaturen $T = 6000$ K i figur 2.1 viser en tilnærming til solstrålingens bølgelengdefordeling. I følge Wiens forskyvningslov er bølgelengden med høyest intensitet i solens strålingsspekter $\lambda_{max} \approx 0,48 \mu\text{m}$. Siden sola er et tilnærmet svart legeme har solstrålingen en lystemperatur på $T = T_s = 6000$ K.

¹Monokromatisk lys vil si lys ved kun én bølgelengde.



Figur 2.2: Figuren illustrerer prinsippet for en solfanger (SF). Strålingsenergi fra solstrålingen G treffer solfangeren. Strålingsenergien blir i solfangeren gjort om til nyttig energi Q_u , med tap til omgivelsene Q_t .

Glødelamper

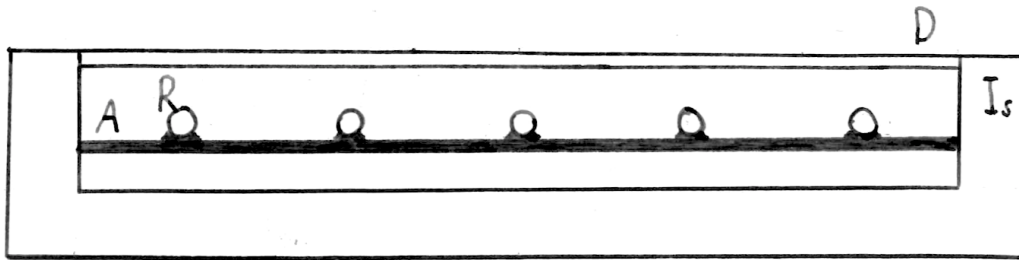
En glødelampe er en lyspære der lyset kommer av at en glødetråd varmes opp ved at det går strøm gjennom den. Oppvarmingen skjer som følge av glødetrådets elektriske motstand. Glødetråden er ofte av materialet wolfram. Jo større elektrisk effekt som tilføres glødetråden, jo varmere blir glødetråden.

En glødetråd kan betraktes som et svart legeme. Dermed kan en glødetråds utstråling approksimeres med Plancks lov (ligning 2.1). Siden en glødetråd blir varmere med økt tilført elektrisk effekt, forskyves i følge Wiens forskyvningslov (ligning 2.2) bølglengdefordelingens toppunkt mot kortere bølglengder ved økt elektrisk effekt tilført. Dermed øker også lystemperaturen til strålingen fra en glødelampe seg, med økt elektrisk effekt tilført glødelampen.

2.2 Flatplatesolfangere

En solfanger

En solfanger er en spesiell type varmeveksler som gjør om energi fra solstråling til nyttig varmeenergi. Dette gjøres ved at solstråling absorberes av en absorbator og ledes til et varmførende medium. Dette mediet kan være for eksempel vann tilført kjølemiddel, eller ulike typer olje, avhengig av typen varmebehov. Noe av

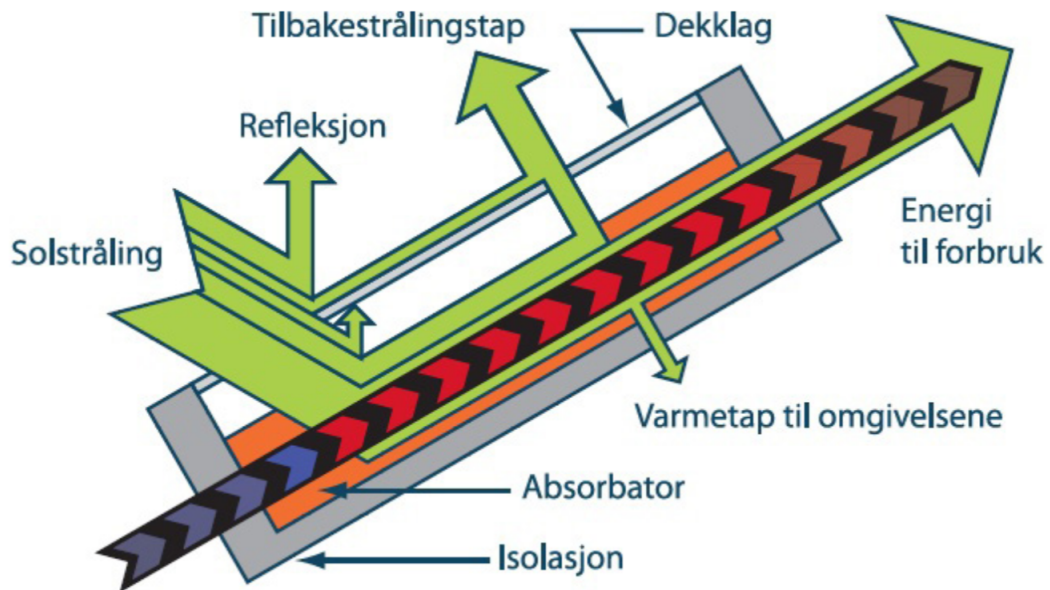


Figur 2.3: Figuren viser en skisse av tverrsnittet til en flatplatesolfanger. A er solfangerens absorbator, R er rørene som er i direkte kontakt med absorbatoren. D er solfangerens dekkglass. Is er solfangerens isolasjon.

energien fra solstrålingen tapes som varme til omgivelsene i overgangen mellom strålingsenergi og nyttig varmeenergi. Den nyttige varmeenergien går videre til bruk der det er behov for varmeenergi, eller til lagring. Figur 2.2 illustrerer prinsippet for en solfanger.

Flatplatesolfanger

En flatplatesolfanger er en solfanger bestående av flate absorbatorplater (en absorbator) som absorberer strålingsenergi fra sola. Absorbatoren er typisk plater av et metall med høy varmeledning. I tillegg er ofte absorbatoren belagt med et meget tynnt lag av et stoff med høy absorptans og lav emittans. I direkte kontakt med absorbatoren går rør med et varmførende medium. Mediet strømmer i rørene over absorbatoren, og absorberer varme fra den. Absorbatorene er ofte montert inne i en kasse, og danner en solfangermodul. Modulen har god isolasjon mot varmeledning på sidene og på undersiden, og et gjennomsiktig dekkglass på oversiden. Dekkglasset består av ett, eller flere lag av et gjennomsiktig materiale, som oftest glass eller ulike typer polymerer. (En flatplatesolfanger har ikke alltid et dekkglass, men denne oppgaven fokuserer på solfangere med dekkglass.) Isolasjonen er tilstede for å minske varmeledningstap fra absorbatoren til omgivelsene. Dekkglasset er tilstede for å minske konveksjonstap og strålingstap. Figur 2.3 viser en skisse av et tverrsnitt av en flatplatesolfanger.



Figur 2.4: Figuren illustrerer energiflyten til en flatplatesolfanger. Deler av den innkommende strålingen reflekteres fra dekkglasset og absorbatoren. Fra både absorbatoren og dekkglasset skjer det tilbakestrålingstap. Fra absorbatoren skjer også varmetap til omgivelsene. Dette inkluderer konveksjonstap og varmeledningstap. Resten av energien er energi til forbruk, eller nyttig energi. I figuren er dekkglasset kalt dekkklag. Figur av Kim Brantenberg **fornybar**

2.2.1 Tap fra en flatplatesolfanger

En solfanger taper energi ved optiske tap, strålingstap, konveksjonstap og varmeledningstap. En forklaring av disse tapsformene beskrives i det følgende. Figur 2.4 viser energiflyten til en solfanger.

Optiske tap

De optiske tapene kommer av at ikke all strålingen fra sola blir absorbert av absorbatoren. De optiske tapene er dermed alt tapet som skjer før strålingsenergien er blitt absorbert av absorbatoren. Ved dekkglasset blir noe av strålingen reflektert tilbake til omgivelsene, og noe av strålingen blir absorbert slik at den ikke når absorbatoren. Ved absorbatoren blir også noe av strålingen reflektert. For å minske optiske tap bør dekkglasset ha høy transmittans og lav dempningskoeffisient for

absorpsjon, og absorbatoren bør ha høy absorptans. De optiske tapene som skjer i dekkglasset beskrives grundigere senere.

Strålingstap

Strålingstap kommer av at absorbatoren blir varm. Absorbatoren, som alle andre legemer, emitterer stråling med en intensitet proporsjonal med dens absolutte temperatur i fjerde potens, som Stefan Boltzmanns lov (2.3) viser. Dekkglasset er blant annet tilstede for å minske strålingstapene. Dekkglasset minsker strålingstapene fra absorbatoren ved å absorbere store deler av absorbatorens varmestråling, for så å emittere deler av den tilbake til absorbatoren.

Varmeledningstap

Varmeledning skjer når to legemer med ulik temperatur er i kontakt med hverandre. I en slik situasjon ledes varme fra legemet med høyest temperatur til det andre. I en solfanger må absorbatoren ha direkte kontakt med den øvrige modulstrukturen, og her vil varmeledning skje. I tillegg kan det skje varmeledning mellom den varme luften på innsiden av en solfangermodul, gjennom modulen og til omgivelsene. For å minske varmeledningstapene er en flatplatesolfanger isolert på sidene og undersiden.

Konveksjonstap

Konveksjonstap fra en flatplatesolfanger skjer når luft med en lavere temperatur enn solfangermodulen beveger seg over modulen. Konveksjonstap skjer ved at varme ledes fra solfangeren til luften, som med sin bevegelse bringer varmen med seg. Dekkglasset er tilstede i en flatplatesolfanger blant annet for å minke konveksjonstapene. Dekkglasset fungerer slik ved at vind ikke kommer i direkte kontakt med absorbatoren, og dermed ikke kan absorbere varmeenergi fra den.

2.2.2 Nyttig effekt fra en flatplatesolfanger

Effektbalanse

Den nyttige effekten fra en solfanger er gitt ved ligning 2.4,

$$\dot{Q}_u = A[S - U_t(T_{gj} - T_o)] \quad (2.4)$$

der \dot{Q}_u er den nyttige effekten fra en solfanger, A er solfangerens fangstareal, S er den strålingseffekten som er tilgjengelig for solfangerens absorptor (det vil si den innstrålte effekten minus de optiske tapene), U_t er solfangerens tapskoeffisient, T_{gj} er absorptorens gjennomsnittlige overflatetemperatur og T_o er temperaturen til omgivelsene. Tapskoeffisienten U_t er en koeffisient der både strålingstap, konveksjonstap og varmeledningstap er tatt hensyn til. Denne kan beregnes hvis mengden effekt absorptoren absorberer og mengden effekt som overføres til det varmebærende mediet er kjent.

S er den delen av den innkommende solstrålingen på solfangeren som blir absorbert av absorptoren. Effekten S er den innkommende strålingseffekten fra sola, minus de optiske tapene ved refleksjon og absorpsjon i dekkglasset og refleksjon fra absorptoren. Den tilgjengelige effekten S blir grundigere beskrevet i kapittel 2.3.4, etter de optiske tapene er beskrevet mer detaljert i kapittel 2.3.

Solfangerens varmetap er avhengig av temperaturforskjellen mellom solfangerens gjennomsnittstemperatur og temperaturen til omgivelsene. De optiske tapene er uavhengig av omgivelsene, og er alltid en bestemt andel av den innkommende effekten.

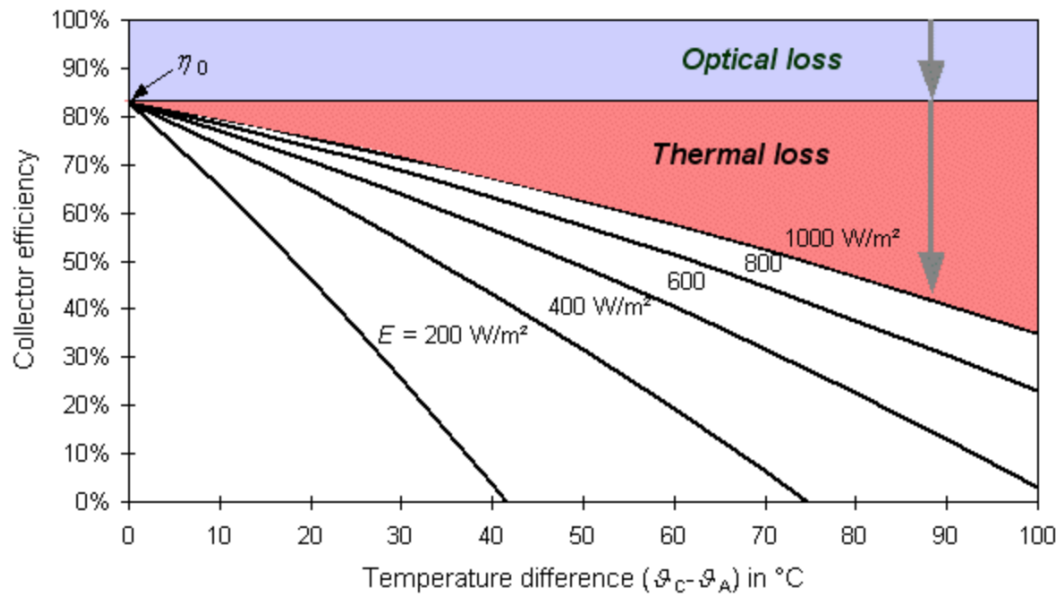
Virkningsgrad

En solfangers virkningsgrad er gitt ved ligning 2.5,

$$\eta = \frac{Q_u}{AG} \quad (2.5)$$

der η er solfangerens virkningsgrad, Q_u er den nyttige effekten levert fra solfangeren, A er solfangerens fangstareal og G er den innkommende strålingsintensiteten.

Siden den nyttige effekten Q_u er en faktor i solfangerens virkningsgrad, er solfangerens virkningsgrad avhengig av solfangerens optiske tap og varmetap. Figur 2.5 viser typiske virkningsgradkurver for en solfanger, for ulike innstrålingsintensiteter. Virkningsgraden η er her plottet mot temperaturforskjellen mellom solfangerens absorptors gjennomsnittlige temperatur og temperaturen til omgivelsene. Figuren viser at de optiske tapene er uavhengig av innstrålt effekt, mens varmetapene varierer med temperaturforskjellen mellom absorptoren og omgivelsene. Figuren viser også at virkningsgraden η er en kombinasjon av disse to tapene.



Figur 2.5: Figuren viser de såkalte Quaschning-kurvene, det vil si en solfangers virkningsgrad plottet mot temperaturforskjellen mellom solfangerens absorbator og omgivelsene, for ulike innstrålingsintensiteter. Figuren viser at de optiske tapene til en solfanger er uavhengig av innstrålingsintensiteten, mens varmetapene ikke er det. På figuren er de optiske tapene (optical loss) og varmetapene (thermal loss) tegnet inn for virkningsgradkurven tilhørende en innstrålingsintensitet på 1000 W/m^2 . Figuren er gjengitt med tillatelse fra Dr. Prof. Quaschning [8].

2.3 Dekkglassets optikk

Dekkglasset brukt i solfangere er gjennomskinnelige materialer, som oftest laget av glass eller polymerer.

2.3.1 Snells brytningslov

Snells lov sier hvordan elektromagnetisk stråling vil brytes når den går fra ett medium til et annet. Hvis stråling beveger seg fra et medium med en brytningsindeks n_1 til et medium med brytningsindeks n_2 vil brytningen av strålingen følge Snells lov gitt ved ligning 2.6,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.6)$$

der θ_1 er innfallsvinkelen til strålingen, og θ_2 er brytningsvinkelen til strålingen. Vinklene θ_1 og θ_2 er målt i forhold til normalen til flaten. Figur 2.6 viser innfallsvinkelen θ_1 , og brytningsvinkelen θ_2 til stråling som beveger seg fra et medium (M_1) med brytningsindeks n_1 til et medium (M_2) med brytningsindeks n_2 . I situasjonen vist i figur 2.6 er $n_1 < n_2$. Gjennomsnittlig brytningsindeks for polykarbonat er $n_{PC} = 1,585$ for bølgelengder i solspekteret, og gjennomsnittlig brytningsindeks for luft er $n_l = 1,000$ for bølgelengder i solspekteret.

2.3.2 Dekkglassets transmittans

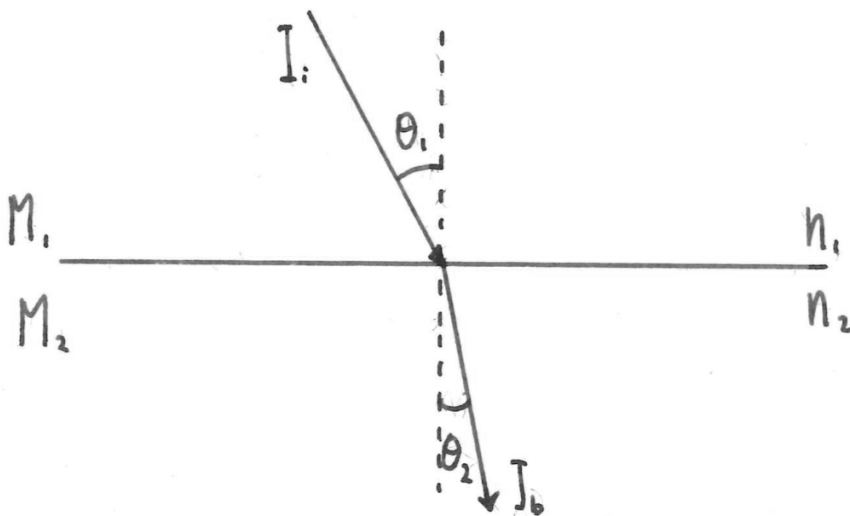
Transmittans

Transmittans er andelen av innkommende stråling på et gjennomskinnelig legeme som beveger seg gjennom det og forlater det på motsatt side. Et legemes transmittans er gitt ved ligning 2.7

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} \quad (2.7)$$

der τ er transmittansen, I_i er intensiteten til den innkommende strålingen og I_t er intensiteten til strålingen som forlater legemet på motsatt side.

Et legemes transmittans er avhengig av materiale, form, reflektans og absorptans. Reflektansen og absorptansen er igjen avhengig av bølgelengdefordelingen til den innkommende strålingen, og retningen strålingen kommer fra.



Figur 2.6: Figuren viser hvordan stråling som går fra et medium (M_1) med brytningsindeks n_1 brytes når det beveger seg inn i et medium (M_2) med brytningsindeks n_2 . I_i er den innkommende strålingen på den gjennomskinnelige flaten, og I_b er strålingen som er brutt og beveger seg videre i medium M_2 . θ_1 er strålingens innfallsvinkel, og θ_2 er strålingens brytningsvinkel. Vinklene θ_1 og θ_2 er gitt i forhold til flaten strålingen bryter sin normalakse. I situasjonen vist i figuren er $n_1 < n_2$.

Refleksjon av stråling fra dekkglass

Når stråling beveger seg fra et gjennomsiktig medium til et annet reflekteres noe av strålingen i stedet for å brytes og bevege seg videre i det nye mediet. Hvor stor andel av strålingen som reflekteres er avhengig av strålingens innfallsvinkel og brytningsindeksen til de to mediene. Om strålingen er polarisert eller ikke, har også innvirkning på andelen stråling reflektert. Refleksjonen av den normale komponenten av strålingen er r_{\perp} , og refleksjonen av den parallelle komponenten av strålingen er r_{\parallel} . For upolarisert stråling er den totale refleksjonen gjennomsnittet av refleksjonen av den normale komponenten og den parallelle komponenten av strålingen. Normal og parallell refererer til planet bestemt av den innkommende strålingsvektoren \vec{I}_i og normalvektoren til flaten \vec{A} . Disse to vektorene, samt strålingsvektoren til den brutte strålingen og den reflekterte strålingen er vist i 2.7. Ved en innfallsvinkel på $\theta_1 = 0^\circ$ er $r_{\perp} = r_{\parallel}$. Ellers er r_{\perp} og r_{\parallel} gitt ved ligning 2.8 og 2.9, og den totale refleksjonen r er gitt ved gjennomsnittet av r_{\perp} og r_{\parallel} vist i ligning 2.10.

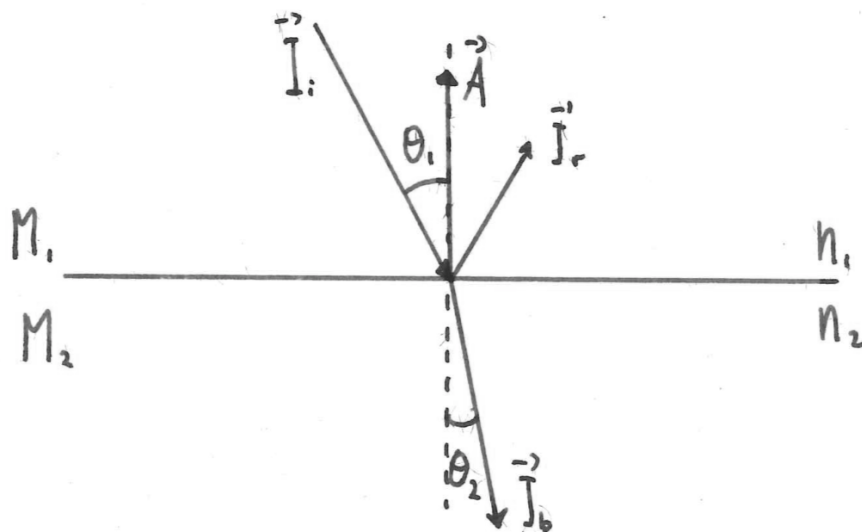
$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.8)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.9)$$

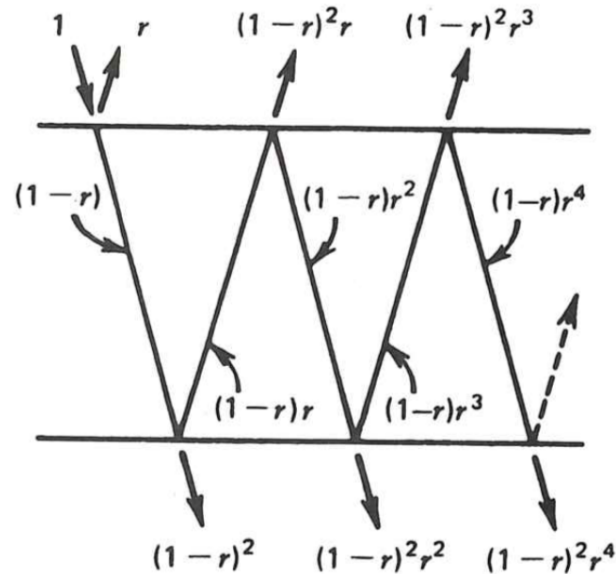
$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (2.10)$$

Her er θ_1 strålingens innfallsvinkel, θ_2 er strålingens brytningsvinkel, I_i er intensiteten til den innkommende strålingen og I_r er intensiteten til den reflekterte strålingen.

Når stråling beveger seg gjennom ett lag av et dekkglass, må strålingen gå både inn og ut av dekkglasset. Det er dermed to overganger mellom ulike medier (luft og for eksempel polykarbonat, så polykarbonat og luft). Refleksjon av stråling skjer ved begge overgangene. Det vil si at noe stråling blir reflektert når stråling beveger seg fra luften utenfor solfangeren inn i dekkglasset, og noe stråling reflekteres inne i dekkglasset når stråling går fra dekkglasset til luften innenfor dekkglasset. Strålingen som blir reflektert inne i dekkglasset kan igjen bli reflektert i det øyeblikket den treffer overgangen mellom dekkglass og luft neste gang. Figur 2.8 illustrerer hva som skjer med stråling som beveger seg gjennom ett lag av et dekkglass.



Figur 2.7: Figuren viser vektorene tilhørende den innkommende strålingen \vec{I}_i , den reflekterte strålingen \vec{I}_r , den brutte strålingen \vec{I}_b og normalvektoren \vec{A} til flaten strålingen reflekteres fra og beveger seg gjennom. Figuren viser i tillegg hvordan stråling som går fra et medium (M_1) med brytningsindeks n_1 brytes når det beveger seg inn i et medium (M_2) med brytningsindeks n_2 . θ_1 er strålingens innfalls-vinkel, og θ_2 er strålingens brytningsvinkel. Vinklene θ_1 og θ_2 er gitt i forhold til normalvektoren \vec{A} .



Figur 2.8: Figuren illustrerer hva som skjer med stråling som beveger seg gjennom ett lag av et ikke-absorberende dekkglass. Andelen stråling som blir reflektert når stråling treffer overgangen mellom lufta og dekkglasset er r . Dermed beveger andelen $(1 - r)$ av den innkommende strålingen seg videre på innsiden av dekkglasset. Når strålingen treffer overgangen mellom dekkglass og luft på den andre siden av dekkglasset blir andelen $r(1 - r)$ av den innkommende strålingen reflektert tilbake igjen. Andelen som så langt har kommet seg gjennom dekkglasset er på $(1 - r)^2$. Denne prosessen inne i dekkglasset fortsetter i det uendelige. Gjengitt med tillatelse fra *Solar Engineering of Thermal Processes. Third edition, J.Duffie et al. (2006)* [9].

Ved hjelp av figur 2.8 blir det tydelig at transmittansen til den normale komponenten av strålingen som følge av svekkelse av lys ved refleksjon, er gitt ved ligning 2.11. Tilsvarende ligning kan finnes for den parallelle komponenten av strålingen.

$$\tau_{\perp} = (1 - r_{\perp})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{2n} = \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \quad (2.11)$$

Her er r_{\perp} refleksjonen til den normale komponenten av den innkommende strålingen. Som tidligere må den normale og den parallelle komponenten av strålingen håndteres hver for seg, fordi deres refleksjon er forskjellig så lenge innfallsvinkelen $\theta_1 = 0^\circ$. I transmittansen τ_{\perp} er ikke absorpsjonstap medberegnet.

Den totale transmittansen til ett lag med dekkglass som følge av svekkelse av stråling ved refleksjon τ_r , er gitt ved gjennomsnittet av transmittansen for den normale komponenten av strålingen og den parallelle komponenten av strålingen. Den totale transmittansen τ_r er dermed gitt ved ligning 2.12

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (2.12)$$

der r_{\parallel} er refleksjonen til den parallelle komponenten til strålingen og r_{\perp} er refleksjonen til den normale komponenten av strålingen.

Dekkglass i en solfanger består ofte av flere parallelle lag av dekkglassmateriale. Ligning 2.12 kan utvides til å gjelde for flere parallelle lag av dekkglassmateriale. Dette gir ligning 2.13, som gir den totale transmittansen τ_{rN} til et dekkglass med N lag av det samme dekkglassmaterialet.

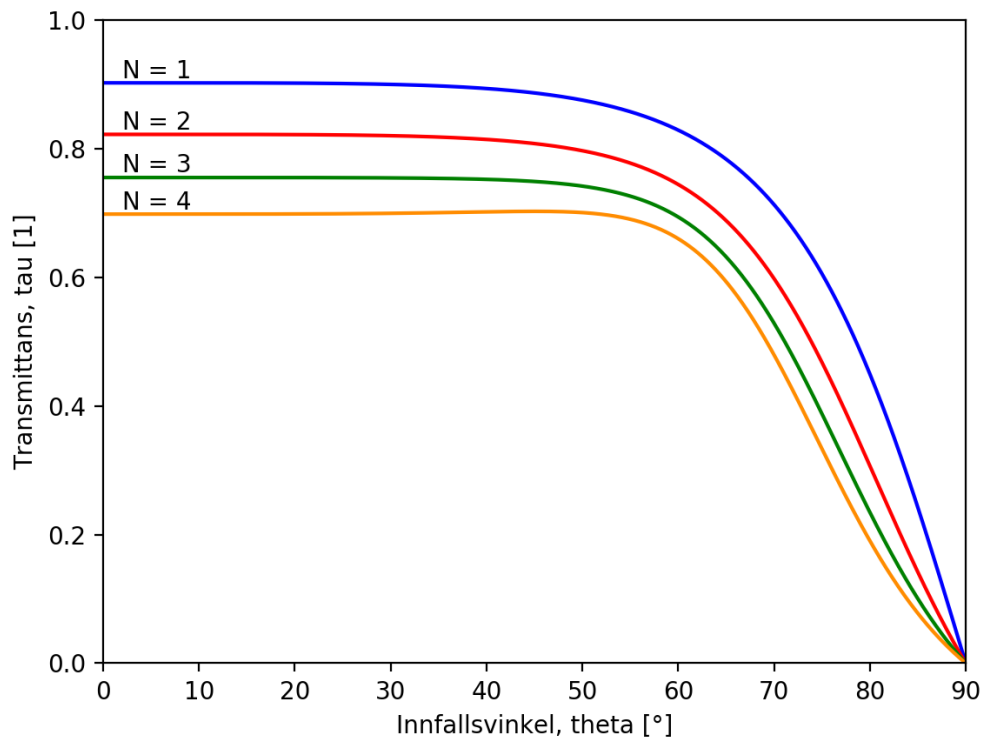
$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + (2N - 1)r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + (2N - 1)r_{\perp}} \right) \quad (2.13)$$

Her er r_{\parallel} refleksjonen til den parallelle komponenten til strålingen og r_{\perp} er refleksjonen til den normale komponenten av strålingen.

Figur 2.9 viser transmittansen τ_r til et dekkglass med brytningsindeks $n = 1,585$ for varierende innfallsvinkel θ . De fire kurvene gjelder for $N = 1$, $N = 2$, $N = 3$ og $N = 4$ parallelle plater av dekkglassmateriale. En brytningsindeks på $n = 1,585$ er typisk for polykarbonat i solspekteret.

Absorpsjon av stråling i dekkglass

Absorpsjonen av stråling i et delvis gjennomsnittlig legeme er avhengig av dets form og materiale. Mengden stråling som absorberes i et bestemt punkt er proporsjonalt med strålingens intensitet i akkurat dette punktet. I tillegg er absorpsjonen avhengig av materialets dempningskoeffisient K , som er en materialkonstant.



Figur 2.9: Figuren viser transmittansen τ_r til et dekkglass, gitt ved formel 2.13. N angir antall lag gjeldene for hver kurve. Figurens x -akse, θ , er innfallsvinkelen til strålingen θ_1 , og figurens y -akse, τ , er dekkglassets totale transmittans τ_{rN} .

Dempningen av stråling i bevegelse gjennom et gjennomskinnelig legeme er gitt av ligning 2.14

$$dI = -IKdx \quad (2.14)$$

der I er strålingens intensitet, x er hvor dypt i legemet strålingen befinner seg og K er materialets dempningskoeffisient. Dempningskoeffisienten K er gitt med enhet m^{-1} .

Fra ligning 2.14 kan det vises at en flat plates transmittans der kun absorpsjon er tatt med i beregningene, er gitt ved ligning 2.15

$$\tau_a = \frac{I_t}{I_i} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \quad (2.15)$$

der τ_a er legemets transmittans, I_i er intensiteten til den innkommende strålingen, I_t er intensiteten til den transmitterte strålingen, K er legemets dempningskoeffisient, L er legemets tykkelse og θ_2 er brytningsvinkelen til den innkommende strålingen. Faktoren $L/\cos\theta_2$ i eksponenten i ligning 2.15 er den totale lengden strålingen må bevege seg gjennom en plate. Figur 2.10 illustrerer at den totale lengden stråling må bevege seg gjennom en flat plate med tykkelse L , er $L/\cos\theta_2$. I figuren er L' den totale lengden stråling må bevege seg gjennom platen. Ved geometriske betraktninger blir det tydelig at den totale lengden strålingen må bevege seg gjennom platen er $L' = L/\cos\theta_2$. Dermed er absorpsjonen av stråling i et dekkglass avhengig av dekkglassets brytningsindeks n_2 via brytningsvinkelen θ_2 og den totale reiselengden gjennom dekkglasset L' .

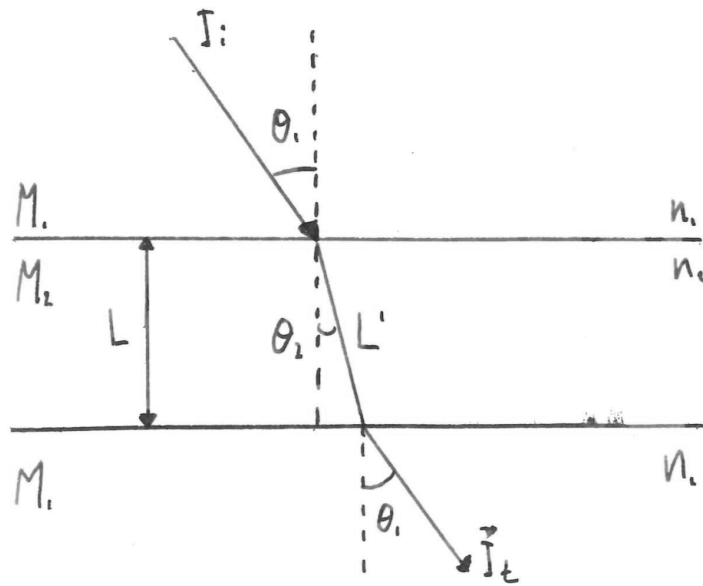
Ved flere parallelle plater av samme materiale i et dekkglass brukes fortsatt ligning 2.15, der $L = L_{tot}$ er den totale lengden strålingen må bevege seg gjennom alle platene, for å finne dekkglassets transmittans τ_a . Dersom alle de parallelle platene i et dekkglass er like tykke kan ligning 2.16 brukes for å finne dekkglassets transmittans τ_{aN} .

$$\tau_{aN} = \exp\left(-\frac{KL_{tot}}{\cos\theta_2}\right) = \exp\left(-\frac{KNL}{\cos\theta_2}\right) \quad (2.16)$$

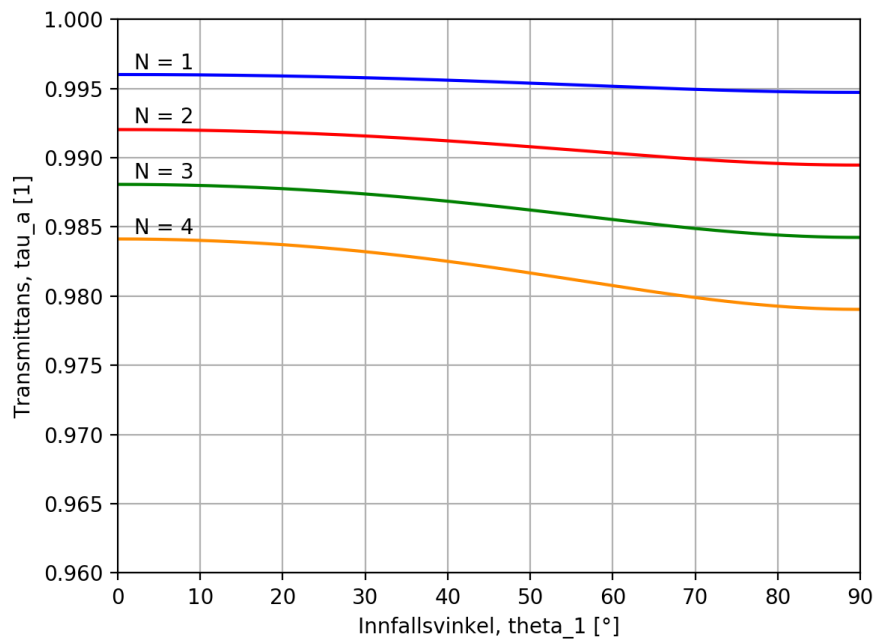
Her er K dempningskoeffisienten til dekkglassets materiale, L_{tot} er den totale lengden strålingen må bevege seg gjennom dekkglassets materiale, L er tykkelsen til en enkelt plate i dekkglasset, θ_2 er brytningsvinkelen til strålingen som treffer dekkglasset og N er antall parallelle plater i dekkglasset.

Dersom platene i solfangeren har forskjellig tykkelse kan ligning 2.17 brukes for å finne dekkglassets transmittans τ_{aN} .

$$\tau_{aN} = \exp\left(-\frac{KL_{tot}}{\cos\theta_2}\right) = \exp\left(-\frac{\sum_{i=0}^N KL_i}{\cos\theta_2}\right) \quad (2.17)$$



Figur 2.10: Figuren viser strålingens bane gjennom en gjennomskinnelig plate med brytningsindeks n_2 . Strålingen går fra et medium M_1 med brytningsindeks n_1 og gjennom et medium M_2 med brytningsindeks n_2 . På figuren er θ_1 strålingens innfallsvinkel, θ_2 er strålingens brytningsvinkel, I_i er den innkommende strålingsintensiteten, I_t er strålingsintensiteten til det transmitterte lyset, L er platens tykkelse og L' er lengden strålingen må bevege seg gjennom platen.



Figur 2.11: Figuren viser transmittansen til et dekkglass τ_a , gitt ved ligning 2.16. N er antall lag gjeldene for hver kurve. Figurens x -akse, θ_1 , er innfallsvinkelen til strålingen θ_1 , og figurens y -akse, τ_a , er dekkglassets transmittans τ_a . For å beregne disse kurvene er en brytningsindeks på $n = 1,526$ benyttet, hvilket er typisk for glass.

Her er K dempningskoeffisienten til dekkglassets materiale, L_{tot} er den totale lengden strålingen må bevege seg gjennom dekkglassets materiale, L_i er tykkelsen til plate nummer i i dekkglasset, θ_2 er brytningsvinkelen til strålingen som treffer dekkglasset og N er antall parallelle plater i dekkglasset.

Figur 2.11 viser transmittansen τ_a til et dekkglass med dempningskoeffisient $K = 4,0 \text{ m}^{-1}$ for varierende innfallsvinkel θ_1 . De fire kurvene gjelder for $N = 1$, $N = 2$, $N = 3$ og $N = 4$ parallelle plater av dekkglassmateriale. En dempningskoeffisient på $K = 4,0$ er typisk for solstråling gjennom klart glass. Figuren viser at transmittansen τ_a er meget høy og lite varierende.

Kombinasjon av refleksjon og absorpsjon

Til nå er gjennomskinnelige objekters transmittans beskrevet for en situasjon der refleksjon fører til svekkelse av stråling gjennom et ikke-absorberende legeme, og

for en situasjon der absorpsjon fører til svekkelse av stråling gjennom et ikke-reflekterende legeme. Det kan vises at den totale transmittansen (det vil si transmittans der både refleksjonstap og absorpsjonstap er tatt hensyn til) for den normale komponenten av strålingen er gitt ved ligning 2.18. En tilsvarende ligning gjelder for den parallelle komponenten av strålingen.

$$\tau_{\perp} = \tau_a \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \left[\frac{1 - r_{\perp}^2}{1 - (r_{\perp} \tau_a)^2} \right] \quad (2.18)$$

I ligning 2.18 er τ_{\perp} den totale transmittansen til et gjennomskinnelig legeme tilhørende den normale komponenten av den innkommende strålingen, τ_a er legemets transmittans som følge av svekkelse av stråling ved absorpsjon og r_{\perp} er refleksjonen til den normale komponenten av strålingen. For dekkglass er vanligvis transmittansen τ_a meget høy, og refleksjonen r_{\perp} meget lav. Dermed kan den siste faktoren i ligning 2.18 tilnærmes til 1 og vi får i kombinasjon med ligning 2.11 og ligning 2.12 den forenklede ligningen 2.19.

$$\tau \approx \tau_a \tau_r \quad (2.19)$$

Her er τ den totale transmittansen til et dekkglass, τ_a er dekkglassets transmittans der kun absorpsjonstap er tatt hensyn til, og τ_r er dekkglassets transmittans der kun refleksjonstap er tatt hensyn til. Siden den transmittansen τ_a er så stor, er den totale transmittansen $\tau \approx \tau_r$.

Transmittansens bølgelengdeavhengighet

Transmittansen diskutert opptil dette punktet gjelder for gjennomsnittlig solstråling, fordi den gjennomsnittlige brytningsindeksen for bølgelengder i solstrålingen er benyttet. I virkeligheten er et legemets transmittans en funksjon av den innkommende strålingens bølgelengde. Transmittansen kan variere mye mellom ulike bølgelengder. Tysik for glass og andre materialer som er gjennomskinnelige i synspekteret er at transmittansen er god for kortbølget stråling (stråling med bølgelengde $\lambda < 3\mu\text{m}$).

Bølgelengde-avhengigheten til et legemes transmittans er avhengig av legemets materiale. Ulike typer glass kan ha meget forskjellig transmittans-bølgelengdekurver. En faktor som kan påvirke bølgelengde-avhengigheten til transmittansen til glass er dets innhold av jernoksid. Både ulike typer glass og ulike typer polymerer har som regel en lav transmittans for langbølget stråling ($\lambda > 3\mu\text{m}$). [12]

2.3.3 Diffus og bakke-reflektert stråling

Transmittansen beskrevet hittil gjelder for direkte stråling med en målbar innfallsvinkel. Transmittansen for diffus og bakke-reflektert stråling vil for et dekkglass være en annen enn for direkte stråling.

Diffus stråling

Den diffuse strålingen kommer av at atmosfæren sprer deler av solstrålingen. Denne spredningen skjer ved hovedsakelig to former spredning, Rayleigh-spredning og Mie-spredning. Rayleigh-spredning skjer når solstråling treffer molekylene i atmosfæren. Det blå lyset fra sollyset spres mest, derfor er himmelen blå. Mie-spredning skjer når stråling treffer partikler i den nedre delen av atmosfæren. Det er Mie-spredning som er grunnen til at skyer er hvite. [13] [14]

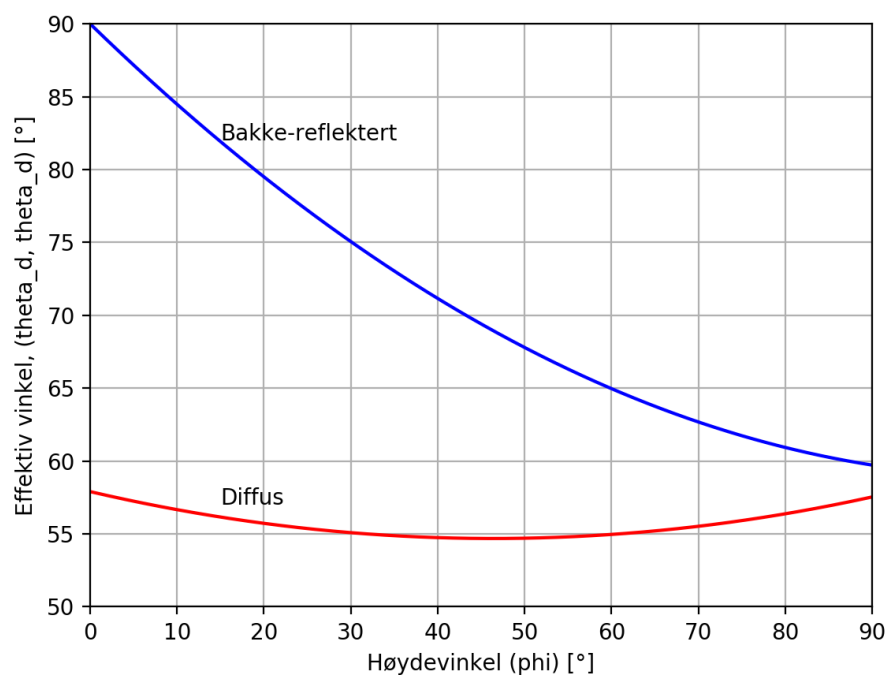
Bakke-reflektert stråling

Noe av solstråling som treffer bakken og omgivelsene blir reflektert. Heretter blir både bakken og omgivelsene referert til som bakken. Hvor mye som blir reflektert av bakken kommer an på bakkens reflektans ρ_g , som er avhengig av blant annet bakkens materiale og fuktighet.

Transmittans mot diffus og bakke-reflektert stråling

En solfangermodul er montert slik at den peker mot sola, men også kan nås av direkte stråling fra bakken. Hvilken azimutvinkel og høydevinkel en solfangermodul er montert ved avhenger av de lokale strålingsforholdene, og omgivelsene rundt solfangermodulen. Hvor stor strålingsintensitet som kommer fra diffus og bakke-reflektert stråling som når solfangeren, er derfor avhengig av solfangerens orientering, og spesielt dens høydevinkel φ .

Det er mulig å modellere diffus stråling og bakke-reflektert stråling som direkte stråling som kommer med en bestemt innfallsvinkel, θ_{ed} og θ_{eg} . θ_{ed} er den effektive innfallsvinkelen til den diffuse strålingen og θ_{eg} er den effektive innfallsvinkelen til den bakke-reflekterte strålingen. Det vil si at transmittansen til den diffuse strålingen følger ligningen $\tau_d = \tau(\theta_{ed})$, der τ_d er et dekkglass' transmittans for diffus stråling og $\tau(\theta_{ed})$ er transmittansen til direkte stråling som kommer med innfallsvinkelen $\theta_1 = \theta_{ed}$. Tilsvarende ligning gjelder for bakke-reflektert stråling.



Figur 2.12: Figuren viser de effektive innfallsvinklene for diffus og bakke-reflektert stråling. Plottets x-akse, ϕ , viser til høydevinkelen den aktuelle solfangeren er montert ved.

Den effektive innfallsvinkelen for diffus og bakke-reflektert stråling kan estimeres med henholdsvis ligning 2.20 og ligning 2.21,

$$\theta_{ed} = 59.7^\circ - 0,1388\varphi + 0,001497\varphi^2 \quad (2.20)$$

$$\theta_{eg} = 90^\circ - 0,5788\varphi + 0,002693\varphi^2 \quad (2.21)$$

der θ_{ed} er den effektive innfallsvinkelen for diffus stråling, θ_{eg} er den effektive innfallsvinkelen for bakke-reflektert stråling og φ er solfangerens høydevinkel. Den estimerte effektive innfallsvinkelen er avhengig av dekkglassets materiale, men variasjonen mellom ulike materialer er meget liten. Dermed kan ligning 2.20 og 2.21 brukes for å estimere den effektive innfallsvinkelen for de fleste vanlige dekkglass-typene.

Figur 2.12 viser de effektive innfallsvinklene for både diffus og bakke-reflektert stråling ved varierende høydevinkel, beregnet ved ligning 2.20 og ligning 2.21. For diffus stråling ligger den estimerte effektive innfallsvinkelen mellom $\theta_{ed} = 54^\circ$ og $\theta_{ed} = 60^\circ$.

2.3.4 Absorbert energi, S

S er den energien som en solfangers absorbatore absorberer (tilgjengelig energi). S er større jo mindre de optiske tapene er. Den tilgjengelige energien S er gitt ved formel 2.22.

$$S = I_{dir}R_{dir}(\tau\alpha)_{dir} + I_{diff}(\tau\alpha)_{diff}\left(\frac{1 + \cos\varphi}{2}\right) + \rho_g I_{dir}(\tau\alpha)_g\left(\frac{1 - \cos\varphi}{2}\right) \quad (2.22)$$

Her er I_{dir} den direkte solstrålingsintensiteten på en horisontal flate, R_{dir} er andelen av I_{dir} som treffer en flate med en høydevinkel på φ , I_{diff} er den diffuse strålingen og ρ_g er bakkens reflektans. $(\tau\alpha)$ er en kombinasjon av dekkglassets transmittans og absorbatorens absorptans, kalt transmittans-absorptans-produktet. $(\tau\alpha)_{dir}$ er transmittans-absorptans-produktet for direkte solstråling, $(\tau\alpha)_{diff}$ er transmittans-absorptans-produktet for diffus stråling og $(\tau\alpha)_g$ er transmittans-absorptans-produktet for bakkereflektert stråling.

Det er ofte komplisert å estimere mange av faktorene i ligning 2.22, som for eksempel bakkens reflektans ρ_g og den diffuse strålingen I_{diff} . Alle transmittans-absorptans-produktene i ligning 2.22 er avhengige av dekkglassets transmittans τ . τ er derfor en svært viktig faktor for solfangerens totale virkningsgrad.

Kapittel 3

Metode

3.1 Utstyr

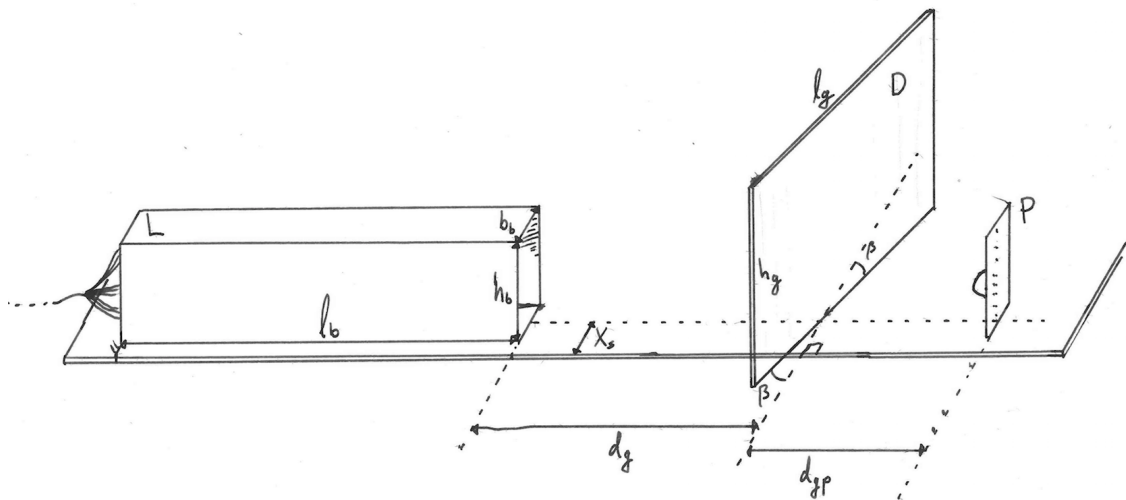
Laboppsettet brukt for å måle dekkglassets transmittans besto av et dekkglass, en lysboks med ni lyspærer i den ene enden, en strømforsyner, en transformator, en kjølevifte, et pyranometer og et multimeter. Figur 3.1 viser en skisse av laboppsettet med alle dets størrelser. Et bilde av laboppsettet er vist i figur 3.2.

Dekkglass

Dekkglasset som er undersøkt er dekkglass type PC 2610-4 produsert av Rodeca, bestående av fire parallelle plater av ekstrudert polykarbonat (PC). De fire platene sitter sammen ved hjelp av skillevegger som står vertikalt på platene. En tegning av dekkglasset er vist i figur 3.3. De fire parallelle platene har ulik tykkelse. De to ytterste har tykkelsen $\gamma_1 = 1,0$ mm, og de to innerste har tykkelsen $\gamma_2 = 0,1$ mm. Ellers er dimensjonene til dekkglasset type 1 vist i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Tabellen viser dimensjonene til dekkglasset. l_g er dekkglassets lengde, h_g dekkglassets høyde, y dekkglassets tykkelse, δ avstanden mellom dekkglassets parallelle plater, x avstanden mellom skilleveggene i dekkglasset, γ_1 tykkelsen til de ytterste platene og γ_2 tykkelsen til de innerste platene.

l_g [cm]	h_g [cm]	y [mm]	x [mm]	δ [mm]	γ_1 [mm]	γ_2 [mm]
63	40	10	10	2,7	1,0	0,1



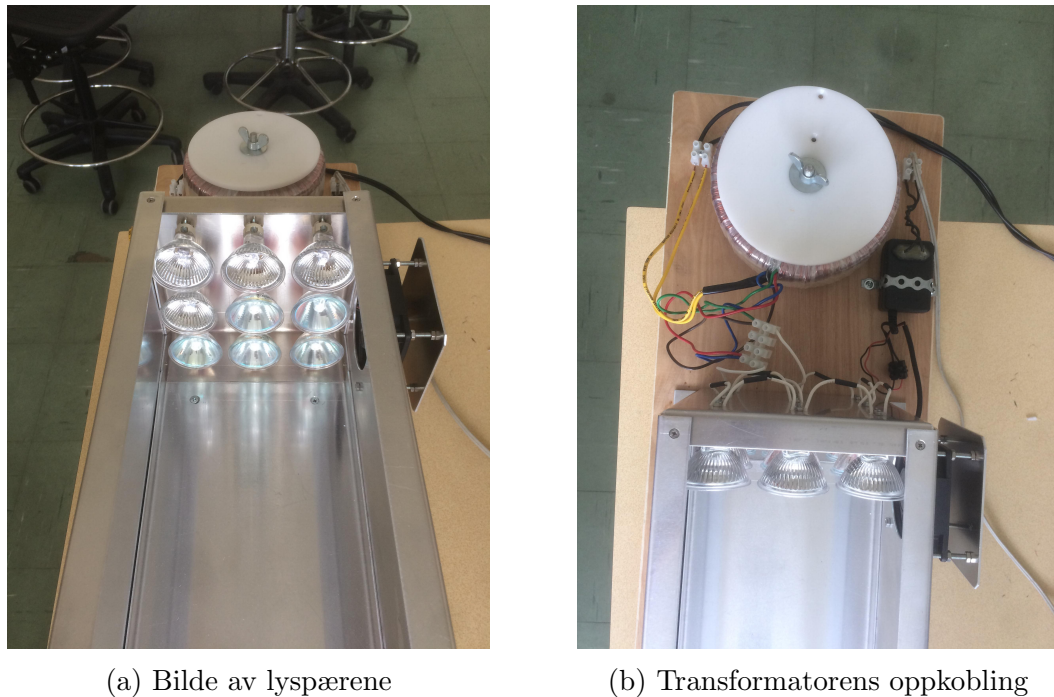
Figur 3.1: Figuren viser laboppsettet med tilhørende størrelser. L i figuren er lysboksen med lengde l_b , høyde h_b , og bredde b_b . D i figuren er dekkglasset med lengde l_g og høyde h_g . Dekkglassets vinkel i forhold til den innkommende strålingen er vist som β . P i figuren er pyranometeret, her uten vinkel i forhold til innkommende stråling. Avstanden fra bordkanten til midten av lysboksåpningen er den samme som avstanden fra bordkanten til midten av pyranometeret, og er vist som x_s . Avstanden mellom lysboksåpningen og dekkglasset ved lysboksens midtpunkt er d_g . Avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret ved pyranometerets midtpunkt er d_{gp} . Avstanden mellom lysboksåpningen og pyranometeret d er summen av d_g og d_{gp} . De elektriske koblingene er ikke vist i figuren.



Figur 3.2: Figuren viser et bilde av laboppsettet brukt for å måle transmittans. På bilde vises lysboksen (L), strømforsyneren (S), transformatoren (T), dekkglasset (D), pyranometeret (P) og multimeteret (står midt på bordet). Dette samsvarer med tegningen i figur 3.1.



Figur 3.3: En tegning av dekkglasset. Figuren er hentet fra Rodeca sin nettside [15].



(a) Bilde av lyspærene

(b) Transformatorens oppkobling

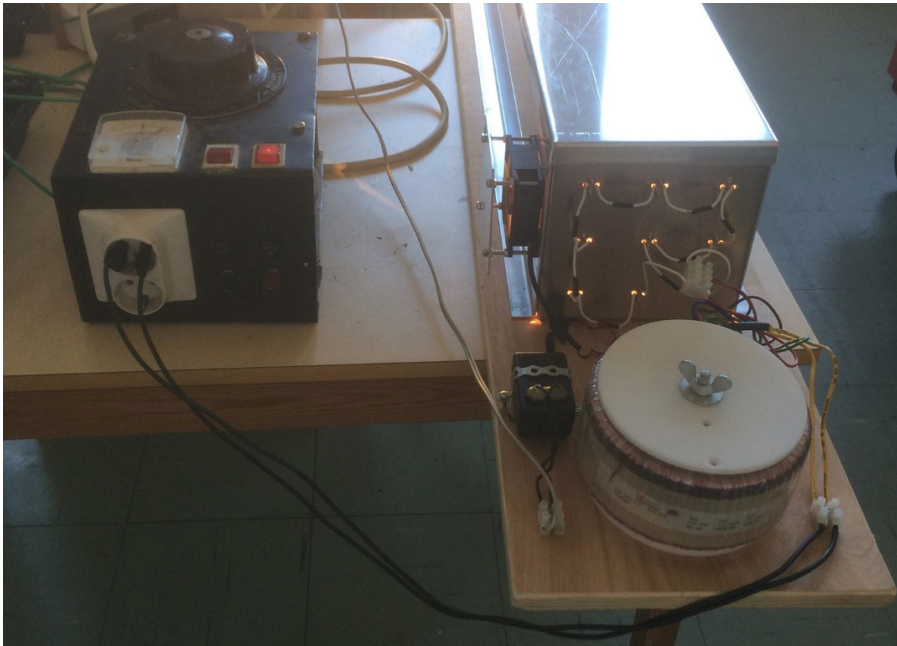
Figur 3.4: Subfigur (a) viser hvordan de ni lyspærene er plassert på innsiden av lysboksen. På høyre side av lysboksen er en vifte montert. Subfigur (b) viser hvordan transformatoren er koblet opp. Dens primærviklinger (gule ledninger) er koblet til strømforsyneren (ikke synlig på bildet), og dens sekundærviklinger (rød, grønn, blå, brun ledning) er koblet til lyspærene på innsiden av lysboksen.

Lysboks

Lysboksen (L i figur 3.1 og 3.2) er en prismeformet boks laget av aluminium der det er lyspærer montert på dens innside i den ene enden, og den andre enden er åpen. Den har en lengde på $l_b = 100$ cm, en bredde på $b_b = 17,0$ cm og en høyde på $h_b = 18,0$ cm. Lysboksen brukes for å forsøke å danne homogen stråling fra lyspærene. Dette oppnås ved at lysboksens innsider er reflektive. Dermed blir lyset fra lyspærene reflektert fram og tilbake inne i lysboksen, og forlater lysboksen mer homogent enn om lysboksen ikke hadde vært til stede.

Lyspærer

Lyspærene er ni pærer produsert av Robus, av typen dikroisk 50MM MR16. De har en merket spenning på $E = 12$ V, en merket effekt på $P = 50$ W, og en merket lystemperatur på 3000 K. Den elektriske effekten levert til lyspærene kommer



Figur 3.5: *Figuren viser hvordan transformatoren og strømforsyningen er koblet sammen.*

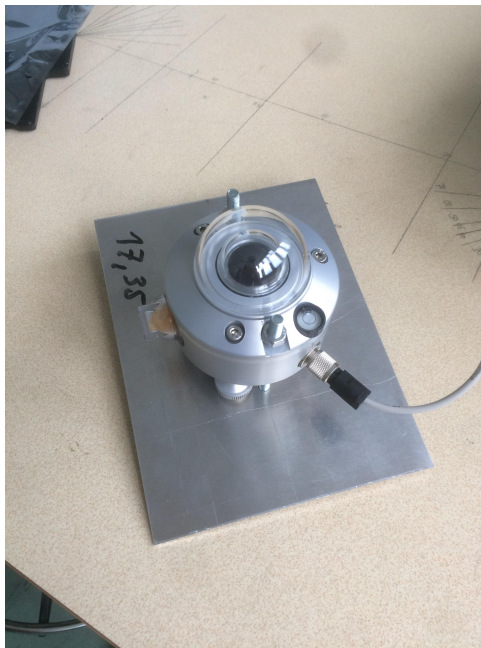
fra strømforsyningen, gjennom en transformator. Lyspærene er montert inne i lysboksen i den ene enden. Figur 3.4 (a) viser hvordan lyspærene er montert på innsiden av lysboksen, i et mønster på 3 ganger 3 pærer. Lyspærene blir i bruk kjølt ned av en vifte montert på siden av lysboksen (på høyre side av lysboksen i figur 3.4).

Transformator og strømforsyning

Transformatoren brukt i laboppsettet er en ringkjernetransformator produsert av Ulveco (i dag Noratel), og er av typen 2990-2110, WEEK 8636, Standard. Dens primærspenning er på $E_p = 220 \text{ V}$, og dens sekundærspenning er på $E_s = 110 \text{ V}$. Figur 3.4 (b) viser hvordan transformatoren er koblet opp. Dens primærviklinger er koblet til strømforsyningen, og dens sekundærviklinger er koblet til lyspærene på innsiden av lysboksen. Hvordan transformatoren og strømforsyningen er koblet sammen er vist i figur 3.5.

Pyranometer

Pyranometeret brukt for å måle lysintensitet er produsert av Kipp & Zonen, og er av typen ISO 9060: first class, pyranometer: CMP 6. Dets sensitivitet mot strålingsintensitet er på $17.35 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$. Pyranometeret ble senest kalibrert den 28. April 2017. Pyranometeret er vist forfra i figur 3.6 (a), og fra siden i figur 3.6 (b). Pyranometerets sensor er montert på en metallplate. Avstanden mellom metallplaten og pyranometerets målepunkt er på $l = 6,5 \text{ cm}$. Rundt sensoren er det to glasskuper som beskytter den. Pyranometeret kobles til et multimeter for å kunne lese av spenningsverdier som brukes for å finne innstrålingsintensiteten målt av pyranometeret. Multimeteret brukt i denne oppgaven er produsert av *FLUKE*, og er av typen *FLUKE 177, True RMS multimeter*.



(a) Bilde av pyranometeret.



(b) Bilde av pyranometeret fra siden.

Figur 3.6: Subfigur (a) viser et bilde av pyranometeret. Pyranometeret består av en strålingsintensitet-sensor montert på en metallplate. Sensoren kobles sammen med et multimeter for å lese av verdier fra pyranometeret. Subfigur (b) viser et bilde av pyranometeret fra siden. På pyranometeret kan data leses av. Avstanden fra metallplaten til pyranometerets målepunkt er i figuren tydelig.

3.2 Kilder til feil, usikkerhet

Før forsøk ble gjort på dekkglassets transmittans, ble variasjonen av målt strålingsintensitet som følge av små endringer i laboppsettet undersøkt. Dette ble gjort for å kunne si noe om usikkerheten i målingene.

Først ble variasjonen av målt intensitet av pyranometeret undersøkt ved å justere vinkelen lysboksen hadde i forhold til pyranometerets normalvektor. Ved en liten endring i lysboksens vinkel, endret den målte spenningen seg meget lite. Det ble derfor ikke tatt videre hensyn til lysboksens vinkel, annet enn at lysboksen ble satt parallell med bordkanten og deretter forble urørt gjennom alle forsøkene.

Deretter ble det undersøkt hvor følsom intensitetsmålingene er ved endring av avstanden mellom lysboksen og pyranometeret. Effekten levert til lyspærene ble holdt konstant. Pyranometerets vinkel ble holdt til $\beta = 0^\circ$ (pyranometerets normalvektor parallell med lysboksens lengdeakse). Deretter ble den innkommende strålingsintensiteten målt i ulike pyranometeravstander (avstand mellom lysboksåpningen og pyranometeret). Det viste seg at pyranometeravstanden utgjorde en forskjell i intensiteten som ble målt. Derfor ble det sørget for at pyranometeret var i riktig avstand gjennom alle forsøkene.

Noe av lyset fra lysboksen ble reflektert fra bordflaten. For å undersøke om dette hadde noe å si for intensitetsmålingene, ble målinger av intensitet målt med pyranometeret i en bestemt avstand, med konstant effekt levert til lyspærene, og med ulike objekter plassert på bordet mellom lysboksen og pyranometeret. Figur 3.7 viser hvilke hindringer brukt, og hvordan de ble plassert. Det ble observert en forskjell i intensiteten målt av pyranometeret med og uten hindringer på bordet. Strålingen reflektert fra bordet uten hindringer var uønsket. Derfor ble senere forsøk gjort med hindringer lagt mellom lysboksen og pyranometeret.

Deretter ble diffus stråling undersøkt. Strålingsintensiteten ble målt med pyranometeret uten noen effekt levert til lyspærene. Pyranometeret ble rettet i mange vilkårlige retninger i rommet. Ingen retninger ga utslag på multimeteret, hvilket betyr at målt spenning av multimeteret var på $U < 0,05$ mV, hvilket tilsvarer en målt intensitet på $G < 3$ W/m². Dette er neglisjerbart og ble dermed ikke tatt videre hensyn til.

Pyranometerets plassering langs lysboksens breddeakse ble så undersøkt. Intensiteten målt av pyranometeret i en bestemt pyranometeravstand og med vinkel $\beta = 0^\circ$ ble undersøkt med sentrum av pyranometerets sensor i ulike plasseringer langs lysboksens breddeakse. Det ble observert en forskjell i målt intensitet. Derfor ble pyranometerets midtpunkt holdt midt på lysboksens breddeakse. Dette er



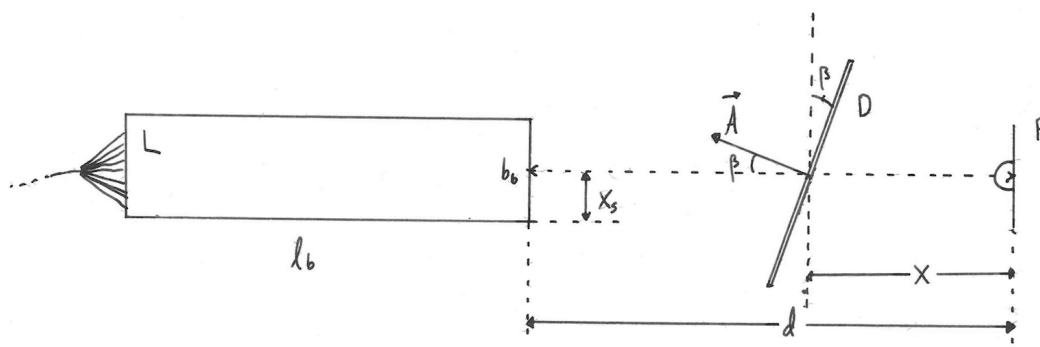
Figur 3.7: Figuren viser hvordan gjenstander ble plassert på bordet mellom lysboksåpningen og pyranometeret for å lage hindringer for den reflekterte strålingen fra bordoverflaten.

illustrert i figur 3.1 som avstanden x_s fra bordkanten.

3.3 Kartlegging av transmittans

3.3.1 Transmittans ved varierende azimutvinkel, *forsøk 1* og *forsøk 2*

For å kartlegge hvordan dekkglassets transmittans τ varierer med azimutvinkelen β ble det først gjort to forsøk, *forsøk 1* og *forsøk 2*. Her refererer ordet *azimutvinkel* til vinkelen dekkglassets normalvektor har i forhold til lysboksen lengdeakse, og at dekkglassets skillevegger står vertikalt på bordet. (Dette kommer til å gjelde i resten av teksten.) Figur 3.8 viser en skisse av laboppsettet brukt i disse to forsøkene sett ovenfra. De to forsøkene er gjort med pyranometeret og dekkglasset plassert i ulik avstand fra lysboksåpningen. Avstanden mellom lysboksen og pyranometeret er vist i figur 3.8 som d , og avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret er vist som x . Avstanden x er den samme som avstanden d_{gp} i figur 3.1.



Figur 3.8: Figuren viser en skisse av laboppsettet ved forsøk 1 og forsøk 2 sett ovenfra. Figuren tilsvarer altså figur 3.1 sett ovenfra. L er lysboksen, D er dekkglasset og P er pyranometeret. Her er d avstanden mellom lysboksåpningen og pyranometeret, og x avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret. x er i figur 3.1 vist som d_{gp} . x_s er avstanden fra bordkanten til midten av lysboksen og pyranometeret. β er vinkelen mellom dekkglassets normalvektor \vec{A} og lengdeaksen til lysboksen.

Forsøk 1: $d = 93,5$ cm

I forsøk 1 ble transmittansen til dekkglasset målt ved azimutvinklene $\beta_i \in [0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ]$ i avstanden $d = 93,5$ cm.

Intensiteten observert av pyranometeret uten bruk av dekkglass ble holdt til $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$ gjennom hele forsøk 1, hvilket tilsvarer en målt spenning på $E^0 = 6,9$ mV på multimeteret. Dette ble gjort ved å plassere pyranometeres sensor i en avstand på $d = 93,5$ cm fra lysboksens åpning, og deretter justere den elektriske effekten gitt til lyspærene fra strømforsyningen, til spenningen på multimeteret viste $E^0 = 6,9$ mV. Denne intensiteten ble valgt for å ikke kjøre lyspærene for hardt. For å minke uønsket stråling reflektert fra bordet til pyranometeret, ble tre objekter lagt på bordet mellom lysboksen og pyranometeret som vist i figur 3.7. Deretter ble dekkglasset plassert vinkelrett på bordets flate mellom pyranometeret og lyskilden i den ønskede azimutvinkelen, og innkommende intensitet på pyranometeret igjen avlest. Mellom hver måling av intensitet med dekkglass, ble det sørget for at den innkommende intensiteten på pyranometeret fortsatt var på $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$. Prosedyren ble gjentatt for alle azimutvinklene.

Beregninger av transmittansen τ_i ved de ulike azimutvinklene β_i ble gjort ved å dividere målt intensitet med dekkglass i azimutvinkel β_i , med intensiteten målt av pyranometeret uten dekkglass. Ligning 3.1 viser hvordan transmittansen er beregnet (ligningen tilsvarer ligning 2.7 fra kapittel 2.3.2).

$$\tau_i = \frac{G_{\beta_i}}{G^0} \quad (3.1)$$

Her er τ_i dekkglassets transmittans ved azimutvinkel β_i , G_{β_i} intensiteten målt av pyranometeret med dekkglass ved azimutvinkel β_i , og G^0 intensiteten målt av pyranometeret uten bruk av dekkglass.

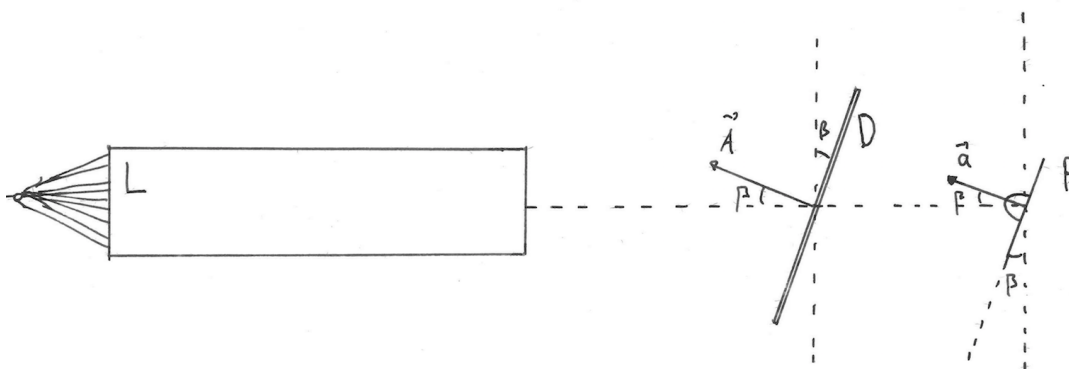
Forsøk 2: $d = 48,5$ cm

I *forsøk 2* ble transmittansen til dekkglasset målt ved azimutvinklene $\beta_i \in [0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ]$ i en avstand på $d = 48,5$ cm mellom lysboksåpningen og pyranometeret. Det ble ikke gjort målinger for azimutvinkelen $\beta = 80^\circ$, da det ikke var plass til dekkglasset mellom lysboksen og pyranometeret ved denne azimutvinkelen. Intensiteten avlest av pyranometeret uten dekkglass ble holdt på $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$, altså en målt spenning på $E^0 = 6,9$ mV. For å få en målt innstrålt intensitet på $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$ i en avstand på $d = 48,5$ cm, ble en lavere elektrisk effekt levert til lyspærene, enn ved *forsøk 1* hvor pyranometeret målte den samme innstrålte intensiteten ved en større avstand, nemlig $d = 93,5$ cm. Prosedyren for måling av innstrålt intensitet ved ulike vinkler, og beregning av transmittansene τ_i , var i *forsøk 2* de samme som i *forsøk 1*.

3.3.2 Transmittans ved varierende lystemperatur

Forsøk 3: Varierende lystemperatur, $d = 48,5$ cm.

Basert på *forsøk 1* og *2*, ble det gjort en undersøkelse av transmittansens avhengighet av lystemperatur: *forsøk 3*. Strålingens lystemperatur varierer med elektrisk effekt tilført lyspærene, som forklart i kapittel 2.1. Når lystemperaturen varierer, varierer også den observerte strålingsintensiteten i en gitt avstand. For å variere lystemperaturen ble strålingsintensiteten avgitt fra lyspærene variert. Dette ble gjort ved å holde pyranometeret i en konstant avstand på $d = 48,5$ cm, og variere effekten levert fra strømforsyneren slik at de ønskede intensitetene ved pyranometeret ble observert. Den observerte strålingen uten bruk av dekkglass ble satt til verdiene $G_i^0 \in [58, 115, 231, 346, 461, 576, 692, 807, 922, 1037] \text{ W/m}^2$, hvilket tilsvarer målte spenninger på $E_i^0 \in [1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0] \text{ mV}$. Dekkglassets azimutvinkel var gjennom hele måleserien satt til $\beta = 0^\circ$. Transmittansen τ_i ble beregnet ved å dividere observert intensitet av pyranometeret med dekkglass G_{gi} , med den observerte strålingen uten dekkglass G_i^0 , som vist i ligning 3.2.



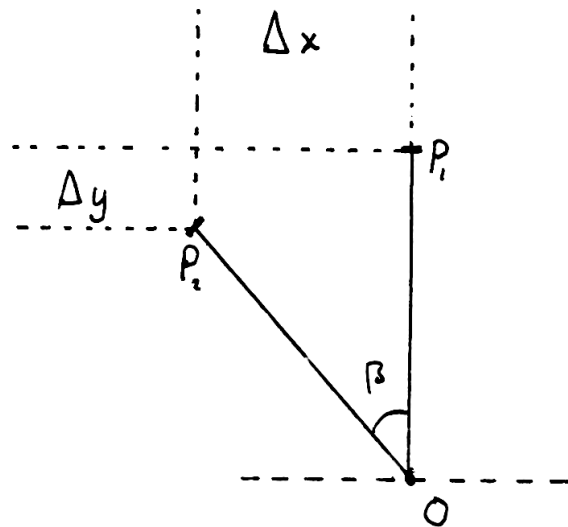
Figur 3.9: Figuren viser en skisse av laboppsettet ved forsøk 4 sett ovenfra. L er lysboksen, D er dekkglasset og P er pyranometeret. Her er β er vinkelen mellom dekkglassets normalvektor \vec{A} og lysboksens lengdeakse, og vinkelen mellom pyranometerets normalvektor \vec{a} og lysboksens lengdeakse. Vinkelen i forhold til lysboksens lengdeakse er altså den samme for både dekkglasset og pyranometeret.

$$\tau_i = \frac{G_{gi}}{G_i^0} \quad (3.2)$$

3.3.3 Transmittans ved varierende azimutvinkel og pyranometer parallelt med dekkglass: *forsøk 4*

Beskrivelse av forsøket

I *forsøk 4* ble ulike intensiteter både med og uten bruk av dekkglass målt, der dekkglasset og pyranometeret gjennom hele forsøket hadde samme vinkel i forhold til lysboksens lengdeakse. Det vil si at dekkglassets normalvektor og pyranometerets normalvektor hele tiden ble holdt parallelle (så lenge dekkglasset var i bruk). Figur 3.9 viser oppsettet der dekkglassets azimutvinkel β_g og pyranometerets vinkel β_p er like. Målingene ble gjort med pyranometeret i avstanden $d = 93,5$ cm fra lysboksen, og dekkglasset i avstanden $d_g = 80,0$ cm fra lysboksen. Pyranometerets observerte intensitet ved vinkelen $\beta_p = 0^\circ$, ble satt til $G^0 = 398$ W/m², altså en spenning på $E^0 = 6,9$ mV målt på multimeteret. Målinger av intensitet med og uten bruk av dekkglass ble gjort for azimutvinklene $\beta_i \in [0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ]$, der β_i er azimutvinkelen til dekkglasset i tillegg til vinkelen til pyranometeret.



Figur 3.10: Figuren illustrerer hvordan målepunktet til pyranometeret forskyves ved endring av pyranometervinkel. Pyranometerets dreiepunkt er i figuren vist som punktet O. Pyranometerets målepunkt er i figuren vist som P_1 for vinkelen 0° , og P_2 for vinkelen β . Forskyvningen ved en økning i vinkel fra 0° til β i x -retning er vist som Δx og forskyvningen i y -retning er vist som Δy . Avstanden mellom punktet O og punktet P_1 er lengden $l = 6,5$ cm.

Forskyvning av målepunkt

På grunn av pyranometerets geometri blir pyranometersensorens målepunkt P forskyvet når pyranometeret endrer vinkel. Dette ble tatt hensyn til ved å geometrisk beregne forskyvningen og justere pyranometerets posisjon for denne. Figur 3.10 illustrerer hvordan pyranometerets målepunkt P forskyver seg, og ligning 3.3 og 3.4 viser hvordan forskyvningen beregnes.

$$\Delta x = l \sin(\beta) \quad (3.3)$$

$$\Delta y = l(1 - \cos(\beta)) \quad (3.4)$$

I ligning 3.3 og 3.4 er Δx målepunktets forskyvning i horisontal retning, Δy målepunktets forskyvning i vertikal retning, l avstanden mellom platen selve pyranometeret er festet på og målepunktet P, og β er pyranometerets azimutvinkel. I figur 3.10 vises hva som menes med horisontal og vertikal retning. Alle størrelsene er vist i figur 3.10.

Beregninger

Ulike forhold ble beregnet ved hjelp av målingene av strålingsintensiteten målt av pyranometeret med pyranometervinkel $\beta = 0^\circ$ uten dekkglass G^0 , strålingsintensiteten målt av pyranometeret med vinkel β_i uten dekkglass $G_{\beta_i}^0$ og strålingsintensiteten målt av pyranometeret med vinkel β_i med dekkglass ved samme vinkel G_{β_i} .

Forholdet mellom intensiteten målt uten dekkglass og med pyranometervinkel $\beta_p = 0^\circ$, og intensiteten målt uten dekkglass med pyranometervinkel β_i , er minkingen av innkommende intensitet som følge av vinkel, ξ_i , og er gitt ved ligning 3.5. Forholdet mellom intensiteten målt med pyranometer og dekkglass i vinkel β_i , og intensiteten målt med pyranometeret i vinkel β_i uten dekkglass, er dekkglassets transmittans τ_i , og er beregnet ved ligning 3.6. Forholdet mellom intensiteten målt med pyranometer og dekkglass i vinkel β_i , og intensiteten målt uten dekkglass ved pyranometervinkel $\beta_p = 0^\circ$, er dekkglassets optiske virkningsgrad η_i , og er beregnet ved ligning 3.7.

$$\xi_i = \frac{G_{\beta_i}^0}{G^0} \quad (3.5)$$

$$\tau_i = \frac{G_{\beta_i}}{G_{\beta_i}^0} \quad (3.6)$$

$$\eta_i = \frac{G_{\beta_i}}{G^0} \quad (3.7)$$

Her er G^0 , $G_{\beta_i}^0$ og G_{β_i} , henholdsvis strålingsintensiteten målt av pyranometeret med pyranometervinkel $\beta = 0^\circ$ uten dekkglass, strålingsintensitet målt av pyranometeret i pyranometervinkel β_i uten dekkglass, og strålingsintensitet målt av pyranometeret ved vinkel β_i med dekkglass ved samme vinkel. ξ_i , τ_i og η_i er henholdsvis minkingen av innkommende intensitet som følge av vinkel, dekkglassets transmittans og dekkglassets optiske virkningsgrad.

3.3.4 Transmittans ved varierende høydevinkel, *forsøk 5*

Hvordan transmittansen varierer med høydevinkelen φ (*forsøk 5*) ble målt på akkurat samme måte som i transmittansen i *forsøk 1*, bortsett fra at dekkglasset var snudd 90° om normalvektor-aksen. Ordet høydevinkel brukes her som vinkelen mellom normalvektoren til dekkglasset og lysboksens lengdeakse, så lenge

dekkglassets skillevegger er parallelle med bordoverflaten. Målingene ble gjort i en pyranometeravstand på $d = 93,5$ cm, en innstrålt intensitet i avstand d uten dekkglass på $G^0 = 398$ W/m², konstant vinkel for pyranometeret $\beta_p = 0^\circ$, og med dekkglassets høydevinkel med verdiene $\varphi_i \in [0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ]$. I tillegg ble dekkglasset plassert i en avstand på $d_g = 80,0$ cm. Dekkglassets transmittans τ_i ved høydevinkel φ_i ble beregnet ved ligning 3.8, der τ_i er dekkglassets transmittans ved høydevinkel φ_i , G_{φ_i} intensiteten målt av pyranometeret med dekkglass ved høydevinkel φ_i , og G^0 intensiteten målt av pyranometeret uten bruk av dekkglass.

$$\tau_i = \frac{G_{\varphi_i}}{G^0} \quad (3.8)$$

3.4 Transmittans ved målinger utendørs

3.4.1 Beskrivelse av oppsett

Målinger av strålingsintensiteter ble så gjort utendørs med solen som strålingskilde, for å bedre tilnærme situasjonen en solfanger i bruk opplever. For å beregne dekkglassets transmittans, ble strålingsintensiteter med og uten bruk av dekkglass målt utenfor Fløy 4, TF, ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige universitet. Figur 3.11 viser stativet brukt for å feste pyranometeret og dekkglasset i ulike azimutvinkler og høydevinkler.

Før målingene ble gjort ble det sørget for at solstrålingen traff pyranometeret med azimutvinkel $\beta = 0^\circ$ og høydevinkel $\varphi = 0^\circ$. Dette ble gjort ved å plassere en blyant vinkelrett på flaten pyranometeret lå på, og stille vinklene slik at blyanten ikke ga noen skygge på flaten.

3.4.2 Transmittans ved varierende azimutvinkel og høydevinkel: *forsøk 9* og *forsøk 10*

Pyranometeret ble plassert på stativet. Innstrålingen på pyranometeret ble målt med og uten dekkglass, tre ganger for alle azimutvinkler $\beta_i \in [0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ]$, og alle høydevinkler $\varphi_i \in [0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ]$. Grunnen til at disse vinklene ble valgt er at det var det som egnet seg fra stativet. Her refererer azimutvinkel og høydevinkel til vinkelforskjellen mellom innstrålingsvektoren til strålingen fra



(a) Bilde av stativet.



(b) Bilde av stativet vinklet og med dekkglass.

Figur 3.11: Subfigur (a) viser et bilde av stativet brukt for å plassere dekkglasset i ulike høydevinkler og azimutvinkler utendørs. Den øverste delen av stativet, med klyper på, kan rotere. Subfigur (b) viser hvordan dekkglasset ble plassert på stativet, og hvordan stativet ble vinklet for å variere innfallsvinkelen til solstrålingen.

sola \vec{I} og normalvektoren til dekkglasset, med dekkglassets skillevegger henholdsvis normale og horisontale. Det ble gjort tre sett med målinger per vinkel fordi strålingen endret seg meget raskt som følge av et tynt skydekke.

Strålingsintensitetene fra *forsøk 9* og *forsøk 10* brukt i beregninger var gjennomsnittet av de tre målingene som ble gjort per vinkel. Utenom dette var prosedyren for å beregne dekkglassets transmittans ved de ulike azimutvinklene den samme som i *forsøk 1*. Det vil si at ligning 3.9 ble brukt for azimutvinkler, og ligning 3.10 for høydevinkler.

$$\tau_i = \frac{G_{\beta_i}}{G^0} \quad (3.9)$$

$$\tau_j = \frac{G_{\varphi_j}}{G^0} \quad (3.10)$$

Her er τ_i dekkglassets transmittans ved azimutvinkel β_i , G^0 solinnstrålingen ved azimutvinkel $\beta = 0^\circ$ og høydevinkel $\varphi = 0^\circ$, G_{β_i} observert stråling med skyggende dekkglass i azimutvinkel β_i . τ_j er dekkglassets transmittans ved høydevinkel φ_j og G_{φ_j} observert stråling med skyggende dekkglass i høydevinkel φ_j .

3.4.3 Diffus stråling

Andelen stråling observert av pyranometeret som kom av diffus stråling ble undersøkt ved å rette pyranometeret i tre vilkårlige retninger i skyggen av solstrålingen. De tre målingene ble gjort ved å rette pyranometeret mot himmelen, parallellt med bakken, og ned mot bakken, alt ved azimutvinkel $\beta \approx 180^\circ$. I tillegg ble innstrålt intensitet målt med pyranometeret rettet mot sola, men i skyggen av en skrivebok. Den målte diffuse strålingsintensiteten varierte mellom $G_{d,min} = 120 \text{ W/m}^2$ og $G_{d,max} = 144 \text{ W/m}^2$.

3.5 Nye forsøk av transmittans

Etter *forsøk 1*, *forsøk 2* og *forsøk 3* var gjort, der dekkglasset fra Rodecas transmittans ble undersøkt ved varierende azimut- og høydevinkel og ved varierende lystemperatur, ble det oppdaget at dekkglassets avstand til pyranometeret også har en innvirkning på pyranometerets målte intensitet. I *forsøk 1*, *2* og *3* ble ikke dette tatt hensyn til og medførte dermed en usikkerhet i disse forsøkene målinger. Derfor kan ikke disse forsøkene sammenlignes med hverandre eller brukes til å konkludere noe om variasjonen til dekkglassets transmittans ved ulike lystemperaturer. Ved *forsøk 4* og *forsøk 5* ble avstanden mellom lysboksen og dekkglasset satt til $d_g = 80\text{cm}$.

Grunnet usikkerheten i målingene som følger av dekkglassets usikre plassering i *forsøk 1*, *forsøk 2* og *forsøk 3*, ble nye målinger av transmittansen til dekkglasset fra Rodeca gjort ved varierende azimutvinkel (*forsøk 11*, *forsøk 12.1* og *forsøk 12.2*) og lystemperatur (*forsøk 13.1* og *forsøk 13.2*), målt i ulike situasjoner. I disse forsøkene ble avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret satt til $d_{gp} = 13,5 \text{ cm}$, hvilket er den samme avstanden brukt i *forsøk 4* og *forsøk 5*. *Forsøk 11* tilsvarer *forsøk 1*, *forsøk 12.1* og *forsøk 12.2* tilsvarer *forsøk 2*, og *forsøk 13.1* og *13.2* tilsvarer *forsøk 3*, der forskjellen mellom forsøkene er at i de senere forsøkene er dekkglassets avstand til pyranometeret satt til $d_{gp} = 13,5 \text{ cm}$. I tillegg ble effekten av dekkglassets avstand til pyranometeret undersøkt i *forsøk 14* og *forsøk 15*.

3.5.1 Transmittans ved varierende azimutvinkler: *forsøk 11, 12.1 og 12.2*

Forsøk 11: $d = 93,5 \text{ cm}$, $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$

Ved *forsøk 11* ble laboppsettet satt opp slik som i *forsøk 1*, men med en avstand på $d_{gp} = 13,5 \text{ cm}$ mellom dekkglasset og pyranometeret. Det vil si at avstanden mellom lysboksen og dekkglasset var $d_g = 80,0 \text{ cm}$, avstanden mellom lysboksen og pyranometeret var $d = 93,5 \text{ cm}$. Den elektriske effekten levert til lyspærene ble justert slik at pyranometeret målte en innkommende strålingsintensitet på $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$, hvilket tilsvarer en målt spenning på $E^0 = 6,9 \text{ mV}$ på multimeteret. Målinger av innkommende intensitet på pyranometeret ble målt for azimutvinklene $\beta_i \in [0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ]$. Det ble ikke gjort måling for azimutvinkel $\beta_i = 80^\circ$ grunnet lite plass mellom pyranometeret og lysboksen. Dekkglassets transmittans ble for hver azimutvinkel beregnet ved ligning 3.11.

$$\tau_i = \frac{G_{\beta_i}}{G^0} \quad (3.11)$$

I ligning 3.11 er τ_i dekkglassets transmittans ved azimutvinkel β_i , G_{β_i} den observerte strålingsintensiteten av pyranometeret med bruk av dekkglass ved azimutvinkel β_i , og G^0 den innkommende strålingen i pyranometeravstand uten bruk av dekkglass.

Forsøk 12.1: $d = 48,5 \text{ cm}$, $G^0 = 836 \text{ W/m}^2$

I *forsøk 12.1* ble dekkglassets transmittans målt ved en pyranometeravstand på $d = 48,5 \text{ cm}$, og en dekkglassavstand på $d_g = 35,0 \text{ cm}$. Avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret ble dermed holdt på $d_{gp} = 13,5 \text{ cm}$. Den elektriske effekten levert til lyspærene ble ikke endret mellom *forsøk 11* og *forsøk 12.1*. Det betyr at lystemperaturen forble uendret mellom disse to forsøkene. Prosedyren for å finne dekkglassets transmittans i denne situasjonen var den samme som ved *forsøk 11*.

Forsøk 12.2: $d = 48,5 \text{ cm}$, $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$

Laboppsettet forble så uendret fra *forsøk 12.1* til *forsøk 12.2*. Den eneste forskjellen mellom *forsøk 12.1* og *forsøk 12.2* var at den elektriske effekten levert til lyspærene ble endret slik at den innstrålte intensiteten målt av pyranometeret var på $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$, altså den samme intensiteten som den målt i *forsøk 11*. Dette ble

gjort for å kunne sammenligne *forsøk 12.2* med *forsøk 2*, der akkurat det samme oppsettet ble brukt, men med usikker dekkglassavstand d_g . Prosedyren for å finne dekkglassets transmittans i denne situasjonen var den samme som ved *forsøk 11* og *forsøk 12.1*.

3.5.2 Transmittans ved varierende lystemperatur: *forsøk 13.1 og 13.2*

Forsøk tilsvarende *forsøk 3* ble så gjort med den satte avstanden på $d_{gp} = 13,5$ cm mellom dekkglasset og pyranometeret. Dette ble gjort i de to avstandene $d = 93,5$ cm og $d = 48,5$ cm, i motsetning til *forsøk 3* som kun ble gjort ved pyranometeravstanden $d = 48,5$ cm.

I *forsøk 13.1* ble dekkglassets transmittans ved varierende innkommende strålingsintensitet målt i en pyranometeravstand på $d = 93,5$ cm, og en dekkglassavstand på $d_g = 80,0$ cm. I *forsøk 13.2* ble dekkglassets transmittans ved varierende innkommende intensitet målt i en pyranometeravstand på $d = 48,5$ cm, og en dekkglassavstand på $d_g = 35,0$ cm. I *forsøk 13.1* ble transmittansen målt for innkommende intensiteter på $G_i^0 \in [58, 115, 231, 346, 461, 576]$ W/m². I *forsøk 13.2* ble transmittansen målt for innkommende intensiteter på $G_i^0 \in [58, 115, 231, 346, 461, 576, 692, 807, 922, 1037]$ W/m². Grunnen til at færre intensiteter ble undersøkt i *forsøk 13.1* er at det ikke var mulig å levere høy nok elektrisk effekt til lypærene for å oppnå de høye innkommende intensitetene i en pyranometeravstand på $d = 93,5$ cm. Dekkglassets transmittans ble beregnet ved ligning 3.12.

$$\tau_i = \frac{G_{gi}}{G_i^0} \quad (3.12)$$

I ligning 3.12 er τ_i dekkglassets transmittans ved en innkommende strålingintensitet på G_i^0 i pyranometeravstand uten bruk av dekkglass, og G_{gi} er strålingsintensiteten observert i pyranometeravstand med bruk av dekkglass.

3.5.3 Variasjon av målt transmittans som følge av avstanden mellom dekkglass og pyranometer, *forsøk 14 og forsøk 15*

Forsøk 14 og 15 ble gjort for å undersøke hvor mye pyranometerets målte intensitet, og dermed dekkglassets målte transmittans, varierte med dekkglassets plassering. Resultatene vil kunne si noe om hvor stor feilen i *forsøk 1, 2 og 3* kan ha vært.

Effekten av dekkglassets plassering ble først undersøkt i en pyranometeravstand på $d = 93,5$ cm (*forsøk 14*). Den elektriske effekten levert til lyspærene ble justert slik at pyranometeret i denne avstanden målte en strålingsintensitet på $G^0 = 398$ W/m², slik som i blant annet *forsøk 1* og *forsøk 11*. Dekkglasset ble plassert i fem ulike avstander, $d_{gi} \in [70, 75, 80, 85, 90]$ cm. For hver avstand ble strålingsintensiteten målt av pyranometeret, G_{gi} , notert. Dekkglassavstandene valgt i dette forsøket er avstanden brukt i *forsøk 11* $d_g \pm 10,0$ cm og $d_g \pm 5,0$ cm, der $d_g = 80$ cm. Dekkglassets transmittans ble for hver dekkglassavstand beregnet ved ligning 3.13,

$$\tau_i = \frac{G_{gi}}{G^0} \quad (3.13)$$

der τ_i er dekkglassets transmittans beregnet med strålingsintensiteten G_{gi} målt med dekkglasset i avstanden d_{gi} og G^0 er strålingsintensiteten målt av pyranometeret uten bruk av dekkglass.

Effekten av dekkglassets plassering ble så undersøkt i en pyranometeravstand på $d = 48,5$ cm (*forsøk 15*). Den elektriske effekten levert til lyspærene forble uendret mellom *forsøk 14* og *forsøk 15*. Det vil si at lystemperaturen ble beholdt, men pyranometerets målte strålingsintensitet økte til $G^0 = 836$ W/m², hvilket tilsvarer intensiteten målt *forsøk 12.1*. Dekkglasset ble plassert i avstanden $d_g = 35,0$ cm $\pm 10,0$ cm, og $d_g = 35,0$ cm $\pm 5,0$ cm. Dekkglassavstandene brukt i dette forsøket var altså $d_{gi} \in [25, 30, 35, 40, 45]$ cm. Prosedyren for å beregne dekkglassets transmittans i de ulike avstandene var den samme som ved *forsøk 14*.

Kapittel 4

Resultater

En rekke forsøk ble gjort på dekkglassenes transmittans med ulikt fokus. Det ble tilsammen gjort 17 forsøk. Tabell 4.1 gir en oversikt over alle forsøkene gjort. De viktige parameterens størrelser er her gitt sammen med forsøksnummeret.

4.1 Dekkglassets transmittans

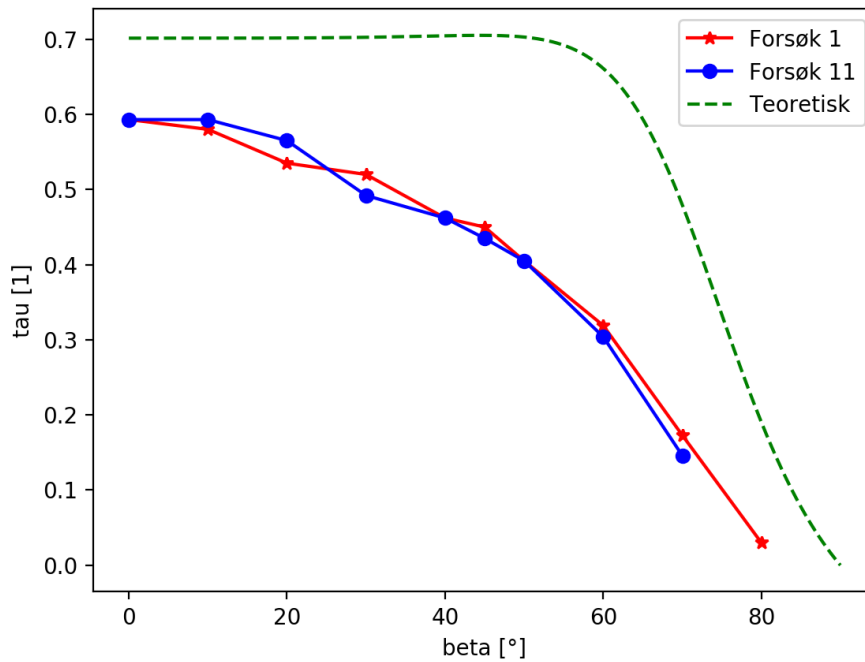
4.1.1 Transmittans ved *forsøk 1* og *forsøk 11*

Figur 4.1 viser transmittans-azimutvinkel-kurven tilhørende *forsøk 1* og *forsøk 11*. Disse to forsøkene er like, utenom at dekkglassets plassering ikke ble notert i *forsøk 1*, men er notert for *forsøk 11*. Kurvene ligger tett opptil hverandre. Det ser ut til at det ikke er noe system i differansen mellom de to kurvene. Den forskjellen som kan observeres regnes dermed som tilfeldig målevariasjon.

Figuren viser at transmittansen til dekkglasset synker med økende azimutvinkel. I tillegg kan det observeres at transmittansen synker raskere med økende azimutvinkel jo større azimutvinkelen er. *Forsøk 11* viser at transmittansen til dekkglasset er $\tau = 0,59$ ved en azimutvinkel på $\beta = 0^\circ$. Når azimutvinkelen har økt til $\beta = 40^\circ$ har dekkglassets transmittans sunket til $\tau = 0,46$. Altså minket dekkglassets transmittans med $\Delta\tau = 0,13$ på de 40° som er mellom en azimutvinkel på $\beta = 0^\circ$, og en azimutvinkel på $\beta = 40^\circ$. En tilsvarende økning av azimutvinkel fra $\beta = 30^\circ$ til $\beta = 70^\circ$, medfører en minking av dekkglassets transmittans på $\Delta\tau = 0,34$ fra $\tau = 0,49$ til $\tau = 0,15$. Ved en azimutvinkel på omtrent 50° til 60° ser det ut til at transmittansen begynner å synke raskere enn ved lavere azimutvinkler.

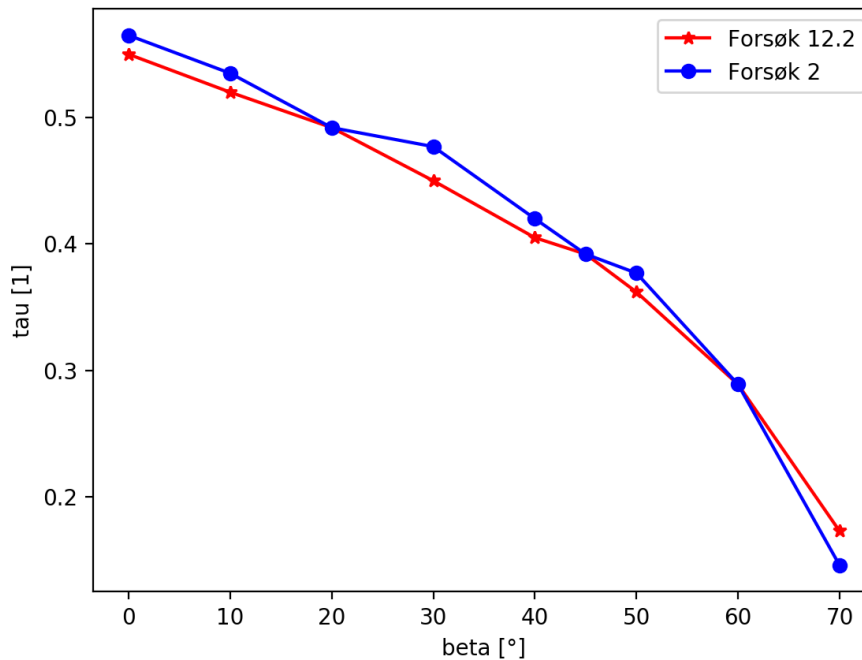
Tabell 4.1: Tabellen viser de ulike parameterens størrelser for alle forsøkene gjort. Her er d avstanden mellom lysboksåpningen og pyranometeret, d_g er avstanden mellom lysboksåpningen og dekkglasset, β_g er dekkglassets azimutvinkel, φ_g er dekkglassets høydevinkel, G^0 er den innstrålte intensiteten på pyranometeret uten dekkglass og β_p er vinkelen til pyranometeret. I tabellen betyr X at dette var den variable parameteren i forsøket.

Forsøk nr.	d [cm]	d_g [cm]	β_g [°]	φ_g [°]	G^0 [W/m ²]	β_p [°]
1	93,5	-	X	0	398	0
2	48,5	-	X	0	398	0
3	48,5	-	0	0	X	0
4	93,5	80,0	X	0	398	X
5	93,5	80,0	0	X	398	0
6	73,0	-	X	0	801	0
7	73,0	-	0	X	525	0
8	73,0	-	0	0	X	0
9	-	-	X	0	-	0
10	-	-	0	X	-	0
11	93,5	80,0	X	0	398	0
12.1	48,5	35,0	X	0	836	0
12.2	48,5	35,0	X	0	398	0
13.1	93,5	80,0	0	0	X	0
13.2	48,5	35,0	0	0	X	0
14	93,5	X	0	0	398	0
15	48,5	X	0	0	836	0



Figur 4.1: Figuren viser to kurver der transmittansen til dekkglasset (τ) er plottet mot azimutvinkel (β). Den røde kurven med stjernemarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 1, og den blå kurven med punktmarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 11. Både forsøk 1 og forsøk 11 er gjort ved en pyranometeravstand på $d = 93,5$ cm, og en innstrålt intensitet på $G^0 = 398$ W/m². I forsøk 1 er dekkglassavstanden ukjent, men den er kjent ved forsøk 11. I tillegg er den teoretiske transmittansen (τ_{rN}) ved $N = 4$ dekkglass vist som den grønne, stiplede kurven. I beregningen av den teoretiske kurven er ikke dekkglassets skillevegger tatt hensyn til.

I figur 4.1 er også den teoretisk beregnede transmittansen τ_{r4} plottet. Denne transmittansen gjelder for fire parallelle dekkglassplater, der kun refleksjonstap er tatt hensyn til. Denne kurven er beregnet ved ligning 2.13 ved hjelp av dekkglassets brytningsindeks og antall lag i dekkglasset, og tilsvarer den nederste kurven i figur 2.9. Figur 4.1 viser at den beregnede transmittansen τ_{r4} er større enn de målte transmittansene for alle azimutvinkler. I tillegg kan det observeres at den beregnede kurven har et skarpere skille ved en azimutvinkel på $\beta = 60^\circ$ enn de målte kurvene.



Figur 4.2: Figuren viser to kurver der transmittansen til dekkglasset (τ) er plottet mot azimutvinkel (β). Den røde kurven med stjernemarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 12.2, og den blå kurven med punktmarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 2. Både forsøk 2 og forsøk 12.2 er gjort ved en pyranometeravstand på $d = 48,5$ cm, og en innstrålt intensitet på $G^0 = 398$ W/m². I forsøk 2 er dekkglassavstanden ukjent, men den er kjent ved forsøk 12.2.

4.1.2 Transmittans ved *forsøk 2* og *forsøk 12.2*

Forsøk 2 og *forsøk 12.2* er like forsøk, utenom at dekkglassets plassering er notert ved *forsøk 12.2*, men ikke ved *forsøk 2*. Figur 4.2 viser transmittans-azimutvinkelkurven tilhørende *forsøk 2* og *forsøk 12.2*. Heller ikke mellom disse to forsøkene kan det observeres en systematisk forskjell. Den differansen som kan observeres mellom de to forsøkene regnes som tilfeldig målevariasjon. Transmittansen funnet i *forsøk 2* og *forsøk 12.2* som vist i figur 4.2, følger samme utvikling som transmittansen funnet i *forsøk 1* og *forsøk 11*. Det vil si at transmittansen minker ved økende azimutvinkel, og ved høye azimutvinkler minker transmittansen raskere enn ved lave azimutvinkler. Det samme skille rundt 50° til 60° som observeres i figur 4.1, observeres også i figur 4.2.

4.1.3 Transmittansberegningers avhengighet av dekkglassets avstand fra pyranometeret, *forsøk 14* og *forsøk 15*

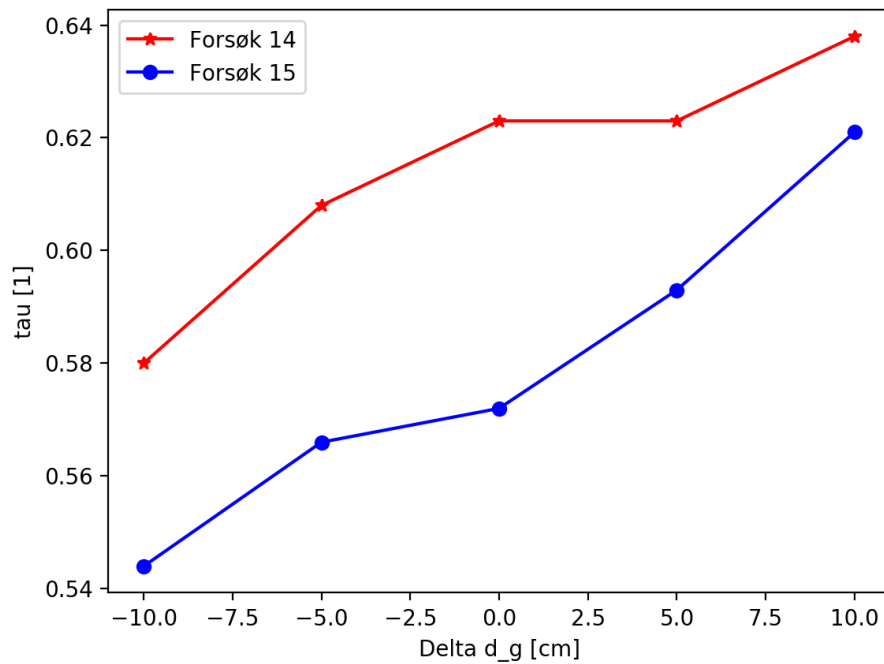
Forskjellen mellom *forsøk 1* og *forsøk 11*, samt mellom *forsøk 2* og *forsøk 12.2*, er at i *forsøk 1* og *2* ble ikke dekkglassets avstand til lysboksen notert, men det ble den i *forsøk 11* og *forsøk 12.2*. Hvilken usikkerhet som følger av en ukjent dekkglassavstand ble undersøkt i *forsøk 14* og *forsøk 15*. I *forsøk 14* ble effekten av dekkglassets plassering undersøkt med pyranometeret i en avstand på $d = 93,5$ cm, og i *forsøk 15* med pyranometeret i en avstand på $d = 48,5$ cm. Dekkglassavstanden brukt i de forsøkene der den ble notert, d_g , ble satt slik at avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret hele tiden var på $d_{gp} = 13,5$ cm. I *forsøk 14* og *forsøk 15* ble avvik på ± 10 cm og ± 5 cm fra dekkglassavstanden som gir avstanden på $d_{gp} = 13,5$ cm mellom dekkglasset og pyranometeret, undersøkt.

Figur 4.3 viser hvordan dekkglassets målte transmittans varierer ved forskjellige dekkglassavstandaer i pyranometeravstand $d = 93,5$ cm (*forsøk 14*) og pyranometeravstand $d = 48,5$ cm (*forsøk 15*). Felles for de to kurvene er at de stiger med økende dekkglassavstand. Det vil si at den målte transmittansen ble større jo kortere avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret var. I pyranometeravstanden $d = 93,5$ cm ble det observert en forskjell på $\Delta\tau = 0,06$ fra $\tau = 0,58$ ved dekkglassavstand $d_g = 70,0$ cm, til $\tau = 0,64$ ved dekkglassavstand $d_g = 90,0$ cm. I pyranometeravstanden $d = 48,5$ cm ble det observert en forskjell på $\Delta\tau = 0,08$ fra $\tau = 0,54$ ved dekkglassavstand $d_g = 25,0$ cm, til $\tau = 0,62$ ved dekkglassavstand $d_g = 45,0$ cm.

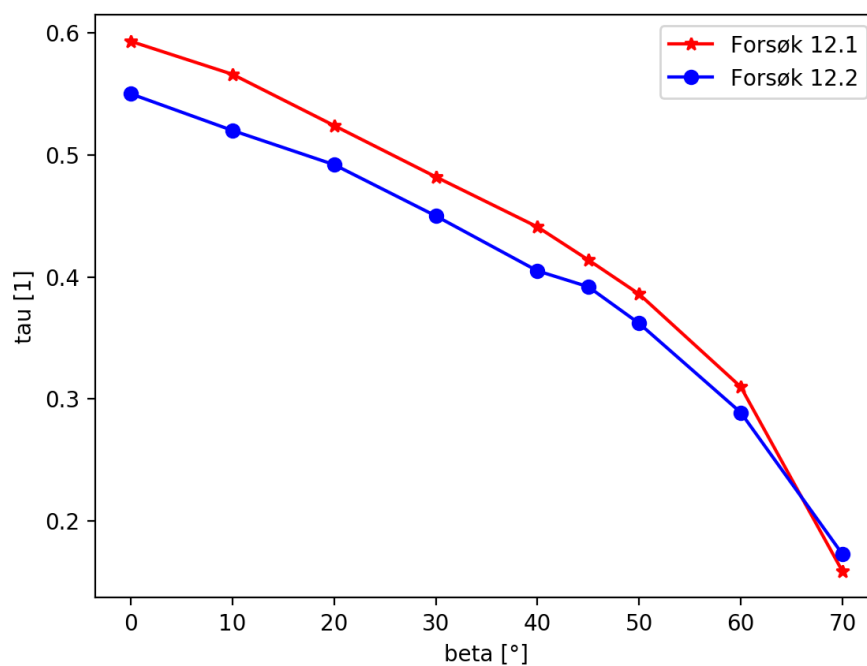
Det er en tydelig forskjell mellom de to kurvene i figur 4.3. Transmittansen målt i pyranometeravstand $d = 93,5$ cm (*forsøk 14*) er konsekvent høyere enn den målt ved pyranometeravstand $d = 48,5$ cm (*forsøk 15*). Det ser likevel ut til at effekten av dekkglassets plassering er nogenlunde den samme i de to forsøkene, da stigningstallet på de to kurvene ser ut til å være omtrent den samme.

4.1.4 Transmittans ved *forsøk 12.1* og *forsøk 12.2*

Figur 4.4 viser transmittans-azimutvinkelkurvene funnet i *forsøk 12.1* og *forsøk 12.2*. Disse to forsøkene ble begge gjort i pyranometeravstand $d = 48,5$ cm, og dekkglassavstand $d_g = 35,0$ cm, men med forskjellig effekt levert til lyspærene. I *forsøk 12.1* ble en strålingsintensitet på 836 W/m² målt av pyranometeret uten bruk av dekkglass og i *forsøk 12.2* ble en strålingsintensitet på 398 W/m² målt av pyranometeret uten bruk av dekkglass. Dekkglassets transmittans ble målt



Figur 4.3: Figuren viser to kurver der transmittansen målt ved varierende dekkglassavstand er plottet for forsøk 14 og forsøk 15. Den røde kurven med stjernemarkeringer viser transmittansen funnet ved ulike dekkglassavstander i forsøk 14, og den blå kurven med punktmarkeringer viser transmittansen funnet ved ulike dekkglassavstander i forsøk 15. Figurens x-akse (Delta d_g) gir avviket til dekkglassavstanden fra dekkglassavstanden $d_g = 80,0$ cm ved forsøk 14, og dekkglassavstanden $d_g = 35,0$ cm ved forsøk 15.



Figur 4.4: Figuren viser to kurver der transmittansen til dekkglasset er plottet mot azimutvinkel (beta). Den røde kurven med stjernemarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 12.1, og den blå kurven med punktmarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 12.2. Disse to forsøkene er gjort i samme pyranometer- og dekkglassavstand, men med en målt innstrålt intensitet uten dekkglass på $G^0 = 836 \text{ W/m}^2$ ved forsøk 12.1 og en målt innstrålt intensitet uten dekkglass på $G^0 = 398 \text{ W/m}^2$ ved forsøk 12.2. Den røde kurven viser en høyere transmittans enn den blå, med unntak av ved azimutvinkel $\beta = 70^\circ$.

ved ulike azimutvinkler.

Av figur 4.4 kan det observeres at dekkglassets transmittans følger den samme utviklingen med økende azimutvinkel i disse to forsøkene, som ved blant annet *forsøk 1* og *11*. Det vil si at transmittansen minker med økende azimutvinkel, og minker raskere ved større azimutvinkler. Det finnes et skille der transmittansen begynner å synke raskere rundt azimutvinkler på 50° til 60° .

I tillegg viser figur 4.4 at det er en forskjell mellom transmittansen funnet i *forsøk 12.1* og *forsøk 12.2*. Kurven for transmittansen funnet ved *forsøk 12.1* er høyere enn kurven funnet ved *forsøk 12.2*. Denne forskjellen blir ikke regnet som tilfeldig. Av figuren ser det ut til at forskjellen mellom de to kurvene minker med økende azimutvinkel. Gjennomsnittsforskjellen mellom transmittansene målt ved azimutvinkel $\beta = 0^\circ$, $\beta = 10^\circ$ og $\beta = 20^\circ$ er på $\Delta\bar{\tau}_1 = 0,04$, mens gjennomsnittsforskjellen mellom transmittansene målt ved azimutvinkel $\beta = 45^\circ$, $\beta = 50^\circ$ og $\beta = 60^\circ$ er på $\Delta\bar{\tau}_2 = 0,02$.

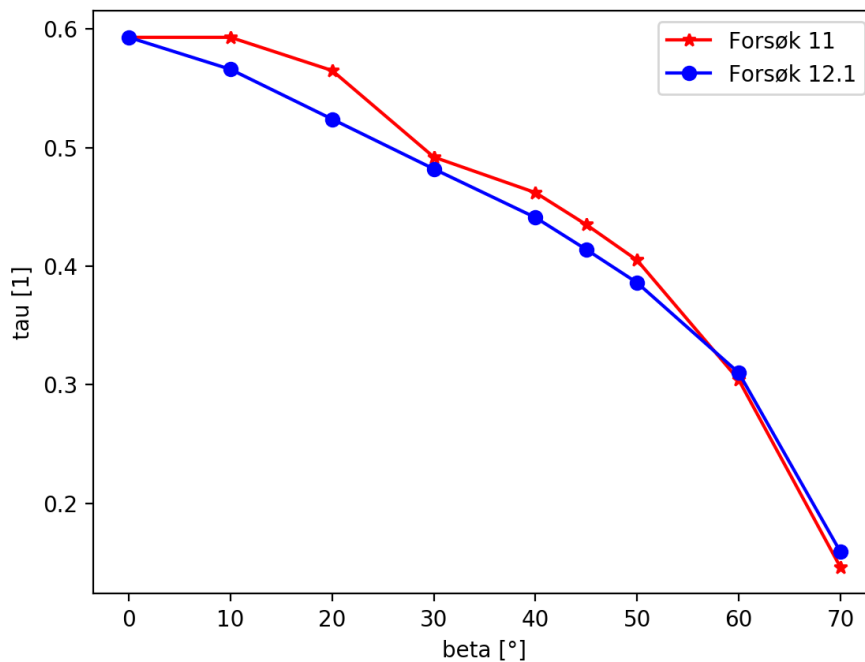
For de siste beregningene av dekkglassets transmittans (azimutvinkel $\beta = 70^\circ$), er transmittansen målt i *forsøk 12.2* større enn den målt ved *forsøk 12.1*. Differansen mellom de to kurvene ved azimutvinkel $\beta = 70^\circ$ er liten i forhold til forskjellen mellom kurvene ved de andre azimutvinklene.

4.1.5 Transmittans ved *forsøk 11* sammenlignet med transmittans ved *forsøk 12.1*

Figur 4.5 viser transmittans-azimutvinkelkurvene funnet i *forsøk 11* og *forsøk 12.1*. Disse to kurvene kan også sees i figur 4.1 der den blå kurven med punktmarkeringer gjelder *forsøk 11*, og 4.4 der den røde kurven med stjernemarkeringer gjelder *forsøk 12.1*.

Disse to forsøkene er gjort i forskjellige avstander fra lysboksen, der pyranometeravstanden og dekkglassavstanden i *forsøk 11* var henholdsvis $d = 93,5$ cm og $d_g = 80,0$ cm, og pyranometeravstanden og dekkglassavstanden i *forsøk 12.1* var henholdsvis $d = 48,5$ cm og $d_g = 35,0$ cm. Lystemperaturen er dog den samme i *forsøk 11* og *forsøk 12.1* fordi effekten levert til lyspærene ved disse to forsøkene er den samme.

Den røde kurven tilhørende *forsøk 11* er høyere enn den blå kurven tilørende *forsøk 12.1* for azimutvinkler $\beta < 60^\circ$. Det ser ikke ut til å være noe mønster i hvor stor forskjellen mellom de to kurvene er. Forskjellen er så stor som $\Delta\tau = 0,04$ ved azimutvinkel $\beta = 20^\circ$, og så lav som $\Delta\tau = 0,01$ ved azimutvinkel $\beta = 30^\circ$. Det ser



Figur 4.5: Figuren viser to kurver der transmittansen til dekkglasset (τ) er plottet mot azimutvinkel (β). Den røde kurven med stjernemarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 11, og den blå kurven med punktmarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 12.1. Disse forsøkene er gjort ved forskjellig pyranometeravstand ($d = 93,5$ cm for forsøk 11 og $d = 48,5$ cm for forsøk 12.2), men de er gjort ved samme lystemperatur. Den røde kurven ligger høyere enn den blå til og med azimutvinkel $\beta = 50^\circ$, men er lavere for azimutvinkler $\beta > 50^\circ$.

likevel ut til at det ikke er tilfeldig at den røde kurven har høyere verdier enn den blå.

4.1.6 Transmittans ved *forsøk 4*

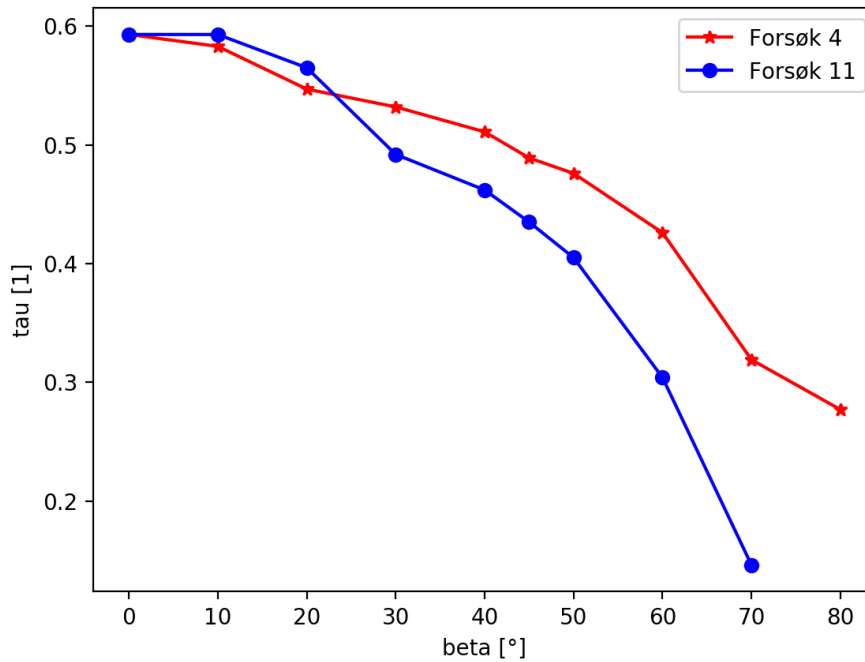
I figur 4.6 vises transmittans-azimutvinkel-kurven funnet ved *forsøk 4*, sammen med transmittans-azimutvinkel-kurven funnet ved *forsøk 11* til sammenligning. *Forsøk 4* og *forsøk 11* ble gjort ved samme pyranometeravstand og dekkglassavstand. Forskjellen mellom de to forsøkene er at pyranometeret ble satt ved samme vinkel som dekkglasset i *forsøk 4*, mens dette ikke ble gjort ved *forsøk 11*. Det vil si at vinkelforskjellen mellom dekkglasset og pyranometeret hele tiden var 0° ved *forsøk 4*, men hele tiden var β ved *forsøk 11* der β var dekkglassets azimutvinkel.

Figur 4.6 viser at transmittansen funnet ved *forsøk 4* var lik den funnet i *forsøk 11* ved azimutvinkel $\beta = 0^\circ$, og lavere enn den funnet i *forsøk 11* ved azimutvinklene $\beta = 10^\circ$ og $\beta = 20^\circ$. Forskjellen mellom de to kurvene ved azimutvinklene $\beta = 10^\circ$ og $\beta = 20^\circ$ kan være tilfeldig målevariasjon. For de resterende azimutvinklene er transmittansene funnet ved *forsøk 4* større enn de funnet ved *forsøk 11*. Denne forskjellen ser ikke ut til å være tilfeldig. Differansen mellom de to kurvene blir større jo større azimutvinkelen er. Dette skjer fordi transmittanskurven funnet ved *forsøk 4* synker tregere enn den funnet ved *forsøk 11*. På de 30° mellom azimutvinkelen $\beta = 30^\circ$ og azimutvinkelen $\beta = 60^\circ$ synker transmittansen funnet ved *forsøk 4* med $\Delta\tau = 0.10$, mens transmittansen funnet ved *forsøk 11* synker $\Delta\tau = 0.20$. Mellom disse to azimutvinklene synker altså transmittansen funnet ved *forsøk 11* dobbelt så fort som den funnet ved *forsøk 4*.

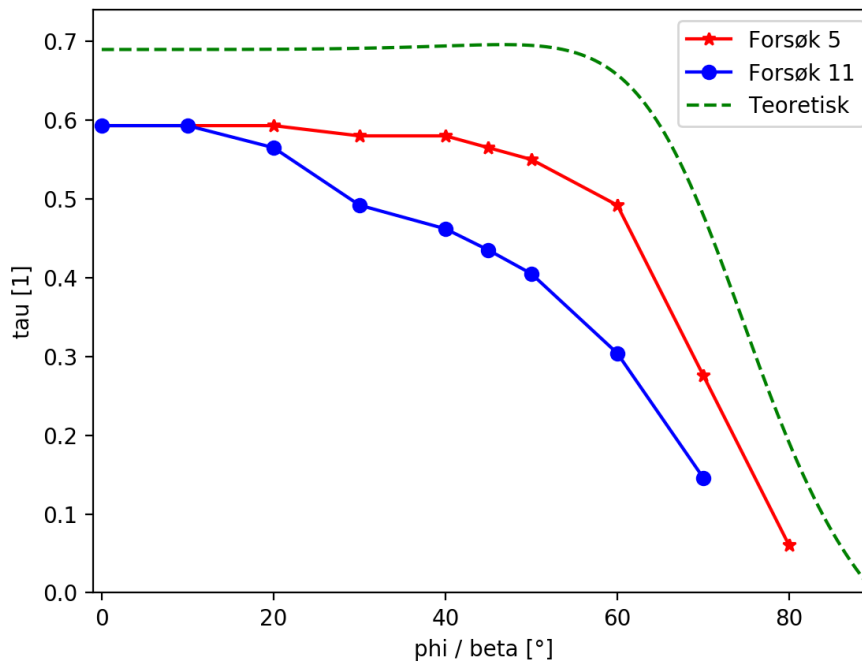
4.1.7 Transmittans ved *forsøk 5*

Figur 4.7 viser tre kurver, der den røde kurven er transmittans-høydevinkel-kurven funnet ved *forsøk 5*, og den blå kurven er transmittans-azimutvinkel-kurven funnet ved *forsøk 11* (til sammenligning). Disse to forsøkene ble gjort ved den samme lystemperaturen (det vil si den samme elektriske effekten levert til lyspærene), den samme pyranometeravstanden, og den samme dekkglassavstanden. Forskjellen mellom de to forsøkene er at ved *forsøk 5* ble dekkglassets høydevinkel φ variert, mens ved *forsøk 11* ble dekkglassets azimutvinkel β variert.

Figur (4.7) viser at dekkglassets transmittans synker tregere ved økende høydevinkel (φ) enn ved økende azimutvinkel (β) for vinkler $\varphi < 60^\circ$ og $\beta < 60^\circ$. Den røde kurven i figur 4.7 tilhørende *forsøk 5* er nesten konstant frem til høydevinkelen $\varphi = 60^\circ$. Endringen av transmittans mellom høydevinkelen $\varphi = 0^\circ$ og $\varphi = 50^\circ$ er



Figur 4.6: Figuren viser to kurver der transmittansen til dekkglasset er plottet mot azimuthvinkel (beta). Den røde kurven med stjernemarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 4, og den blå kurven med punktmarkeringer viser dekkglassets transmittans funnet ved forsøk 11. Disse to forsøkene ble gjort i samme pyranometeravstand $d = 93,5$ cm og ved en samme innstrålingsintensitet. Forskjellen mellom forsøkene er at ved forsøk 4 ble vinkelen til dekkglasset og pyranometeret holdt like, men i forsøk 11 endret kun vinkelen til dekkglasset seg. For azimuthvinklene $\beta = 0^\circ$, $\beta = 10^\circ$ og $\beta = 20^\circ$ ligger den røde kurven på, eller under den blå kurven. Den røde ligger høyere enn den blå fra og med azimuthvinkel $\beta = 30^\circ$.



Figur 4.7: Figuren viser to kurver der transmittansen til dekkglasset (τ) er plottet mot høydevinkel (ϕ) og azimutvinkel (β). Den røde kurven med stjernemarkerer viser dekkglassets transmittans ved varierende høydevinkel (ϕ) funnet ved forsøk 5, og den blå kurven med punktmarkeringer viser dekkglassets transmittans ved varierende azimutvinkel (β) funnet ved forsøk 11. Den røde kurven er konsekvent større enn den blå, med unntak av ved azimutvinklene $\beta = 0^\circ$ og $\phi = 0^\circ$ der de to kurvene er like. I tillegg viser figuren den teoretiske transmittansen til fire parallelle plater av polykarbonat, der kun refleksjonstap er tatt hensyn til, som den grønne stiplede kurven.

på kun $\Delta\tau = 0,04$, mens endringen av transmittans mellom azimutvinkel $\beta = 60^\circ$ og $\beta = 70^\circ$ er på $\Delta\tau = 0,19$.

Ved en høydevinkel på $\varphi = 50^\circ$ til $\varphi = 60^\circ$ er det et skille der dekkglassets transmittans begynner å synke raskt med økende høydevinkel. Dette skillet kan også observeres ved økende azimutvinkel, men ikke like tydelig som ved økende høydevinkel. Dette skillet er tydelig i alle figurene vi har sett av transmittans undersøkt ved økende høydevinkel eller azimutvinkel, utenom i figur 4.6 der den røde kurven ser ut til å synke jevnt hele veien.

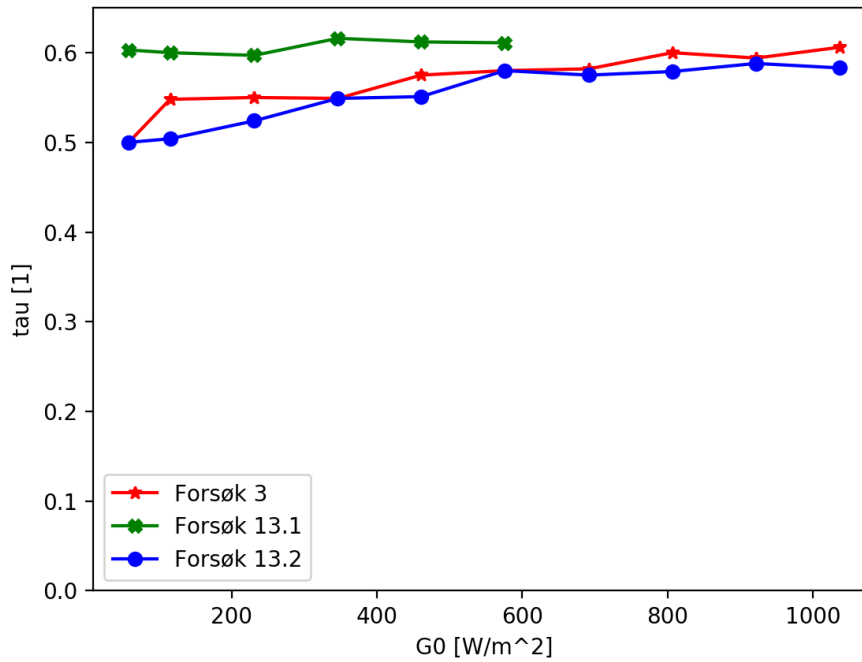
Den tredje kurven vist i figur 4.7 viser den teoretiske transmittansen τ_{r4} som den grønne stiplede linjen. Transmittansen τ_{r4} gjelder for fire parallelle plater av polykarbonat, der kun refleksjonstap er tatt hensyn til. Denne transmittansen tar ikke hensyn til skilleveggene i dekkglasset. Denne kurven har samme form som den kurven tilhørende *forsøk 5*. Disse kurvene har et like tydelig skille rundt vinkelen $\beta = 60^\circ$, der transmittansen begynner å synke raskere med økt vinkel. Kurven tilhørende *forsøk 5* er dog lavere enn den teoretiske kurven, for alle høydevinkler φ .

4.1.8 Transmittans ved varierende lystemperatur: *forsøk 3, 13.1 og 13.2*

Figur 4.8 viser transmittanskurvene funnet ved *forsøk 3, 13.1 og 13.2*. I disse forsøkene ble dekkglassets transmittans undersøkt ved varierende innkommende intensitet, og dermed også ved varierende lystemperatur. I *Forsøk 3* og *forsøk 13.2* ble transmittansene målt ved den samme pyranometeravstanden på $d = 48,5$ cm. Forskjellen mellom *forsøk 3* og *forsøk 13.2* er at dekkglassavstanden ikke ble notert i *forsøk 3*, men det ble den i *forsøk 13.2*. I *forsøk 13.1* ble transmittansen målt ved pyranometeravstanden $d = 93,5$ cm.

For en enkelt kurve er det lite variasjon mellom transmittansene avhengig av lystemperatur til den innkommende strålingen. Ved *forsøk 3* og *13.2*, henholdsvis rød og blå kurve i figur 4.8, ble en lav stigning av transmittans med lystemperatur observert. Ved en økning av innstrålt intensitet på 979 W/m^2 fra den første til den siste målingen i måleserien, ble en økning av transmittans på $\Delta\tau = 0,11$ observert ved *forsøk 13.2*. En tilsvarende økning ble observert ved *forsøk 3*. Ved *forsøk 13.1* observeres ikke en tydelig stigning av transmittans med lystemperatur.

Det ser ikke ut til å være noe mønster i differansen mellom kurven tilhørende *forsøk 3* og kurven tilhørende *forsøk 13.2*. Kurvene kan antyde at kurven tilhørende *forsøk 3* er noe høyere enn kurven tilhørende *forsøk 13.2*. Det er derimot en tydelig



Figur 4.8: Figuren viser tre transmittanskurver. Den røde kurven med stjernemarkerings er transmittansen funnet i forsøk 3, den blå kurven med punktmarkeringer er transmittansen funnet i forsøk 13.2, og den grønne kurven med kryssmarkeringer er transmittansen funnet i forsøk 13.1. Forsøk 3 og 13.2 er gjort ved samme pyranometeravstand på $d = 48,5$ cm, mens forsøk 13.1 er gjort ved pyranometeravstanden $d = 93,5$ cm. Transmittansene funnet i disse forsøkene (τ) er i denne figuren plottet mot den innkommende strålingen (G_0). Kurven tilhørende forsøk 13.1 har ikke verdier for strålingsintensiteter $G_0 > 600$ W/m^2 , grunnet begrensninger ved laboppsettet.

forskjell mellom kurven tilhørende *forsøk 13.1* og kurvene tilhørende *forsøk 3* og *forsøk 13.2*. Transmittansen funnet ved *forsøk 13.1* er høyere enn den funnet ved *forsøk 3* og *forsøk 13.2* for alle intensiteter målt.

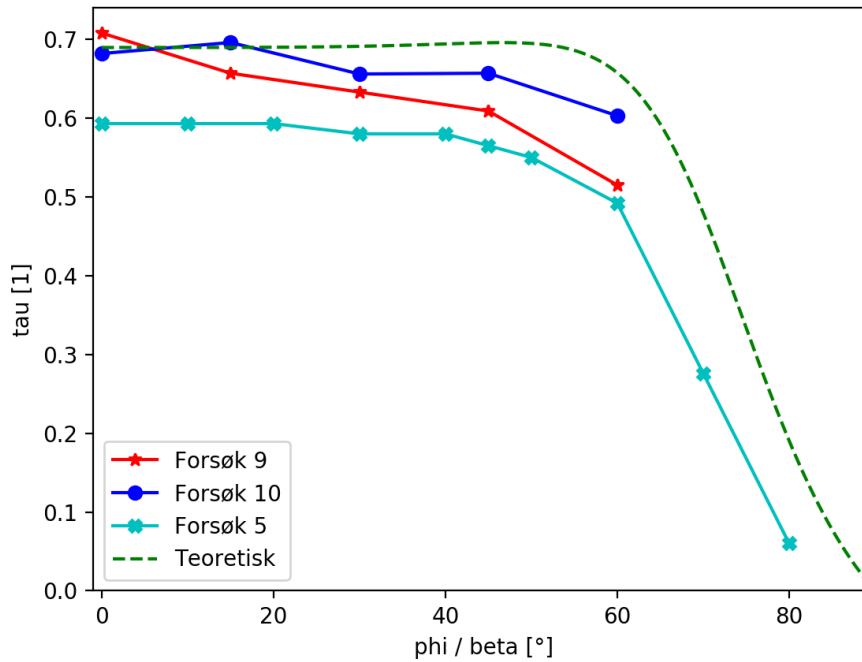
4.2 Transmittans målt utendørs, *forsøk 9* og *10*

Figur 4.9 viser transmittansen funnet utendørs ved *forsøk 9* og *forsøk 10*, samt transmittansen funnet innendørs ved *forsøk 5* til sammenligning. Transmittanskurven funnet ved *forsøk 9* viser hvordan dekkglassets transmittans endrer seg med azimutvinkel med solen som strålingskilde, mens transmittanskurven funnet ved *forsøk 10* viser hvordan dekkglassets transmittans endrer seg med høydevinkel.

Transmittansene funnet utendørs er høyere enn de funnet innendørs ved *forsøk 5*. For eksempel var den største transmittansen funnet utendørs med hverken azimutvinkel eller høydevinkel $\tau = 0,71$, mens transmittansen funnet ved høydevinkel $\varphi = 0^\circ$ i *forsøk 5* var $\tau = 0,59$.

Av figur 4.9 kan det også observeres at forskjellen mellom transmittanskurven ved azimutvinkel og høydevinkel (rød og blå kurve) ikke er like stor som i figur 4.7. I figur 4.7 vises forskjellen i transmittansens utvikling ved azimutvinkel og høydevinkel funnet innendørs ved *forsøk 5* og *forsøk 11*. Den blå kurven med punktmarkeringer i 4.7 er den samme som den lyseblå med kryssmarkeringer i figur 4.9. I 4.7 er forskjellen mellom de to kurvene $\Delta\tau = 0,19$ ved en azimutvinkel og høydevinkel på $\beta = \varphi = 60^\circ$. I figur 4.9 er den samme forskjellen i transmittans $\Delta\tau = 0,09$ mellom den røde og den blå kurven ved en azimutvinkel og høydevinkel på $\beta = \varphi = 60^\circ$.

Figur 4.9 viser også den teoretisk beregnede transmittansen τ_{r4} . Denne transmittansen gjelder for fire parallelle polykarbonatplater der kun refleksjonstap er tatt hensyn til. For lave vinkler ligger de målte verdiene ved *forsøk 9* og *10* tett på den teoretiske kurven. Forskjellen mellom den teoretiske kurven og målingskurvene ser ut til å øke med økt vinkel.



Figur 4.9: Figuren viser fire transmittanskurver. Den røde kurven med stjerne-markeringer og den blå kurven med punktmarkeringer er henholdsvis dekkglassets transmittans funnet utendørs ved varierende azimuthvinkel (forsøk 9) og varierende høydevinkel (forsøk 10). Forskjellen mellom disse forsøkene er at ved forsøk 9 ble dekkglassets azimuthvinkel variert, mens ved forsøk 10 ble dekkglassets høydevinkel variert. Den grønne kurven med kryssmarkeringer er transmittansen funnet ved varierende høydevinkel i forsøk 5, og er til sammenligning. Den grønne stiplede kurven viser den teoretiske transmittanskurven for fire parallelle plater av polykarbonat, der kun refleksjonstap er tatt hensyn til.

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Diskusjon av målte transmittanskurver

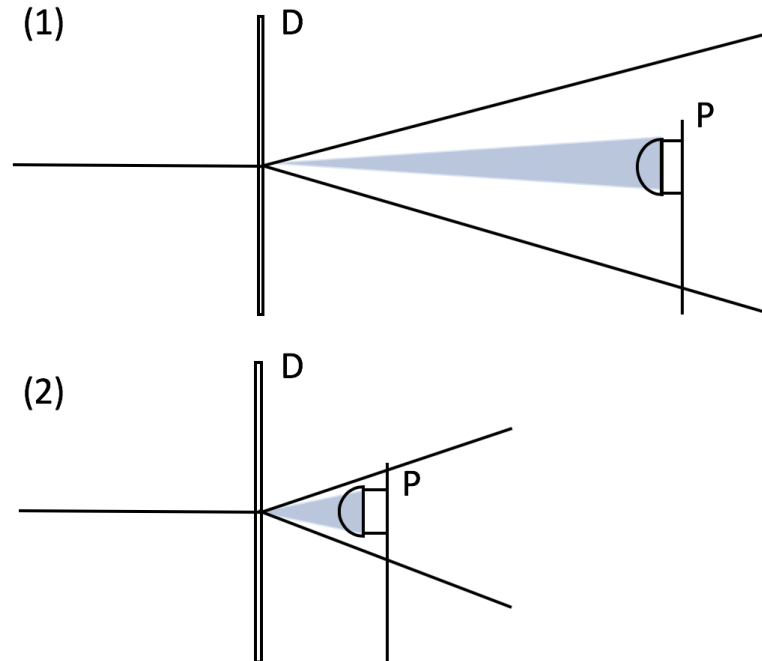
5.1.1 Spredning av stråling

Spredning ved ulike dekkglassavstander

Figur 4.3 viser at den målte intensiteten fra pyranometeret er avhengig av dekkglassets avstand til pyranometeret. Dermed skulle det forventes en forskjell mellom transmittansen målt ved kjent og ukjent dekkglassavstand. Både figur 4.1 og 4.2 viser at det ikke var noen tydelig forskjell mellom transmittansen målt ved kjent og ukjent dekkglassavstand. Dette kommer trolig av at dekkglasset tilfeldigvis ble plassert rundt en avstand på $d_{gp} = 13,5$ cm fra pyranometeret ved *forsøk 1* og *forsøk 2* der dekkglassavstanden ikke ble notert, altså rundt den samme avstanden fra pyranometeret som i *forsøk 11* og *12.2* der dekkglassavstanden ble notert.

Figur 4.3 viser at den målte intensiteten blir større jo nærmere pyranometeret dekkglasset er. Grunnen til dette er at dekkglasset sprer den innkommende strålingen. Jo lenger unna pyranometeret dekkglasset står, jo mer stråling rekker å bli spredd vekk fra pyranometerets fangstareal.

Dette fører også til at den målte transmittansen beregnet med intensiteten målt av pyranometeret, ikke representerer den virkelige transmittansen til dekkglasset. Dette fordi noe av strålingen spres i tillegg til at det transmitteres gjennom dekkglasset, og dermed ikke observeres av pyranometeret. Den målte transmittansen representerer heller transmittansen for direkte stråling, altså hvor stor andel av strålingen som transmitteres uten å spres. Figur 5.1 illustrerer forskjellen mellom



Figur 5.1: Figuren illustrerer hvordan avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret påvirker måling av strålingsintensitet ved spredning av stråling fra dekkglasset. *D* i figuren er dekkglasset og *P* er pyranometeret. Det innkommende lyset blir i denne figuren spredt når det treffer dekkglasset. Dette er illustrert ved de to skrå strekene over og under sensoren til pyranometeret. Den delen av strålingen som treffer pyranometerets sensor er i figuren skravert i blått. Det er tydelig at andelen stråling som når pyranometeret i situasjon (2) hvor avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret er kort, er større enn i situasjon (1) hvor avstanden mellom dekkglasset og pyranometeret er lang.

spredning av stråling ved en lang og en kort avstand mellom dekkglasset og pyranometeret. Med en virkelig transmittans som er høyere enn den målt i denne oppgaven, vil en solfanger absorbere mer energi enn det transmittansene målt i denne oppgaven skulle tilsi.

Transmittans målt med pyranometeret parallellt med dekkglasset

I *forsøk 4* ble transmittansen til dekkglasset beregnet ved hjelp av intensitetsmålinger gjort med pyranometeret holdt parallellt med dekkglasset. Som vist i figur 4.6 ble det i *forsøk 4* målt en høyere transmittans for store azimutvinkler enn ved *forsøk 11*, hvor pyranometeret ikke ble holdt parallellt med dekkglasset. Dette

kommer trolig av at pyranometeret i *forsøk 4* observerte en større andel av det spredte lyset, fordi pyranometeret var rettet mot dekkglasset. Denne situasjonen ligner mer på det som skjer for en solfanger i bruk, fordi absorbatoren i en solfanger er parallell med solfangerens dekkglass uavhengig av innstrålingens innfallsvinkel.

Transmittansmålinger ved ulike pyranometeravstander

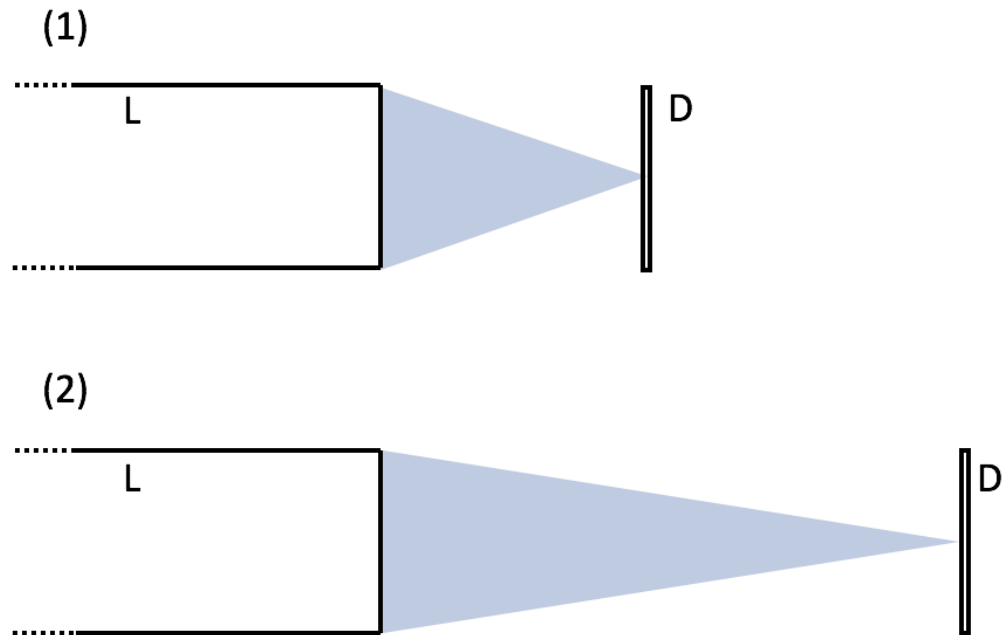
Både figur 4.3 og figur 4.5 viser at målt transmittans ved samme lystemperatur var høyere ved større pyranometeravstand. *Forsøk 14* og *forsøk 15* er gjort i forskjellige avstander og ved samme lystemperatur. Her er transmittansen beregnet med målinger gjort i avstanden $d = 93,5$ cm større enn transmittansen beregnet med målinger gjort i avstanden $d = 48,5$ cm, uavhengig av dekkglassets avstand til pyranometeret. Det samme gjelder transmittansen funnet i *forsøk 11* sammenlignet med transmittansen funnet i *forsøk 12.1*. Denne forskjellen kommer sannsynligvis av at strålingen som treffer dekkglasset ved en lang avstand mellom lysboksen og dekkglasset er mer ensretta enn ved en kort avstand til dekkglasset. Mer ensretta stråling spres trolig mindre enn mindre ensretta stråling. Figur 5.2 illustrerer forskjellen mellom innkommende stråling på dekkglasset ved en lang og en kort dekkglassavstand.

I figur 4.5 minker forskjellen mellom de to kurvene for økende azimutvinkel. Beregningen av transmittansene i figur 4.5 er gjort ved samme lystemperatur, men ved forskjellige dekkglass- og pyranometeravstander. Minkingen av forskjellen mellom kurvene skjer mest sannsynlig fordi mer av den innkommende strålingen blir reflektert ved første kontakt med dekkglasset. Som følge av dette vil en mindre andel av den innkommende strålingen spres ved å komme i kontakt med dekkglassets indre struktur. Dermed blir spredning av lys en mindre viktig faktor for målt intensitet ved høyere azimutvinkler.

En annen mulig grunn til at forskjellen mellom kurvene i figur 4.5 blir mindre med økt azimutvinkel, er at en større andel av den transmitterte strålingen blir påvirket av dekkglassets skillevegger. Det er usikkert akkurat hva som skjer med strålingen som går gjennom dekkglassets skillevegger, men det antas at dette fører til et større tap. Tapet som følger av dekkglassets skillevegger er ikke nødvendigvis avhengig av hvor ensretta den innkommende strålingen er.

Spredning ved azimutvinkel og høydevinkel

Spredningen av stråling fra dekkglasset kommer av skilleveggene i dekkglasset. Jo større andel av strålingen som blir påvirket av skilleveggene, jo mer stråling



Figur 5.2: Figuren illustrerer ved hvilke vinkler stråling fra lysboksen kan nå ett bestemt punkt på dekkglasset. Situasjon (1) viser dekkglasset (D) i kort avstand fra lysboksen (L) og situasjon (2) viser dekkglasset i lang avstand fra lysboksen. Strålingen som når dekkglasset er mer ensretta (kommer med mindre maksimalvinkel) ved en lang dekkglassavstand, enn ved en kort avstand. På figuren er prinsippet illustrert for ett punkt på dekkglasset. En lignende situasjon vil gjelde for alle punkt på dekkglasset.

vil spres. Ved en økning i dekkglassets azimutvinkel vil en større andel av den innkommende strålingen treffe dekkglassets skillevegger, men ved en økning av høydevinkel vil ikke andelen stråling som blir påvirket av dekkglassets skillevegger endre seg.

Som figur 4.7 viser, synker transmittanskurven ved økt azimutvinkel raskere enn transmittanskurven ved økt høydevinkel. Forskjellen mellom kurven tilhørende *forsøk 5* og kurven tilhørende *forsøk 11* er tapet av stråling ved en økt azimutvinkel.

Selv om andelen stråling som blir påvirket av dekkglassets skillevegger er uavhengig av høydevinkel, vil strålingen målt i *forsøk 5* ved økt høydevinkel også være påvirket av skilleveggene. Omtrent 10% av dekkglasset (1 mm per cm) er påvirket av skilleveggene. Det vil si at ved en azimutvinkel $\beta = 0^\circ$ vil likevel 10% av strålingen bli påvirket av skilleveggene. Hvordan skilleveggene påvirker strålingen er uvisst, men det antas at de fører til et tap. Dette gjør at transmittanskurven ved økt høydevinkel vist i figur 4.7 også er lavere enn den ville vært hvis dekkglasset ikke hadde skillevegger. Det er ikke kjent hvor stor denne effekten er.

Figur 4.7 viser i tillegg at forskjellen mellom kurvene tilhørende azimutvinkel og høydevinkel, øker fram til en vinkel på omtrent 60° , men forskjellen mellom kurvene minker igjen etter en vinkel på omtrent 60° . Dette kommer trolig av at ved store vinkler vil en større andel av den innkommende strålingen bli reflektert ved første kontakt ved dekkglasset, og blir dermed ikke påvirket av dekkglassets skillevegger. Dette gjelder for både økt azimutvinkel og økt høydevinkel.

En økt spredning av stråling fører sannsynligvis til at en større andel av strålingen går tapt. I så fall vil en solfanger tape mer energi ved en økt azimutvinkel, enn ved en økt høydevinkel.

5.1.2 Målt transmittans ved ulik lystemperatur

Figur 4.8 viser at den målte transmittansen øker med lystemperaturen til den innkommende strålingen. I figur 4.8 er denne effekten tydeligst for *forsøk 13.2* som er gjort i en pyranometeravstand på $d = 48,5$ cm. Det er ikke gjort like mange målinger i *forsøk 13.1* i en avstand på $d = 93,5$ cm. Dermed kan det ikke sies sikkert at den målte transmittansen øker med lystemperatur også ved *forsøk 13.1*.

Figur 4.4 viser også en høyere transmittans beregnet med strålingsintensiteter med en høyere lystemperatur. Her er *forsøk 12.1* gjort ved en høyere lystemperatur enn *forsøk 12.2*. Forskjellen mellom kurvene blir mindre med økt azimutvinkel. Også

her kommer dette mest sannsynlig av at en større andel av strålingen blir reflektert ved første kontakt med dekkglasset, og dermed ikke blir påvirket av dekkglassets indre struktur.

Denne effekten av lystemperatur på målt transmittans, kommer trolig av at dekkglasset absorberer godt i bølgelengder over $\lambda = 3 \mu\text{m}$, og er omtrent ugjennomskinnelig for bølgelengder $\lambda > 6 \mu\text{m}$. Lyspærene sender ut stråling ved en lystemperatur på omtrent 3000 K, og er tilnærmede svarte legemer. Det vil si at lyspærenes bølgelengdefordeling omtrent følger Plancks lov for et svart legeme med en temperatur på 3000 K. Bølgelengdefordelingen ville i figur 2.1 ligge mellom kurven for 6000 K og for 1000 K. Det er dermed tydelig i figur 2.1 at lyspærene vil sende ut en viss andel stråling med bølgelengde over $\lambda = 3 \mu\text{m}$. Lyspærene sender også ut en enda mindre andel stråling ved bølgelengder $\lambda > 6 \mu\text{m}$.

Lystemperaturen til strålingen er ikke eksakt 3000 K, men vil variere rundt 3000 K avhengig av hvilken elektrisk effekt som blir levert til lyspærene. En økt elektrisk effekt levert til pærene øker lystemperaturen til strålingen, som igjen minker mengden stråling ved bølgelengder $\lambda > 6 \mu\text{m}$. Stråling med lystemperaturen som tilsvarende en lysintensitet på 836 W/m^2 vil derfor ha en mindre andel stråling som blir absorbert av dekkglasset enn stråling ved lystemperaturen som tilsvarende en lysintensitet på 398 W/m^2 . Det er trolig denne forskjellen som vises mellom kurvene i figur 4.4.

5.1.3 Transmittans målt utendørs

Figur 4.9 viser at transmittansen målt utendørs med sola som lyskilde, er større enn den målt innendørs med lyspærene som lyskilde. Dette gjelder både transmittansen funnet ved varierende azimutvinkel og ved varierende høydevinkel.

Dette kan komme av flere ting. For det første er strålingen fra sola mer ensretta. Den innkommende strålingen består av tilnærmet parallelle strålingsbølger. Hvis det er slik at mer ensretta lys fører til mindre spredning av stråling (som diskutert i kapittel 5.1.1), vil dette føre til at strålingen fra sola blir mindre spredt av dekkglasset enn strålingen innendørs.

For det andre har solstrålingen en høyere lystemperatur enn strålingen fra lyspærene. Dette kommer av at overflatetemperaturen til sola er omtrent 6000 K, og at sola er et tilnærmet svart legeme. Som diskutert i kapittel 5.1.2 øker den målte transmittansen jo høyere lystemperaturen på den innkommende strålingen er.

For det tredje var også diffus stråling en viktig del av den innkommende strålingen ved målingene gjort utendørs. Transmittansen som gjelder for den diffuse delen

av strålingen er lavere enn den som gjelder for den direkte strålingen, som vist i figur 2.12. Den innkommende strålingen utendørs besto av en betydelig andel diffus stråling. Siden transmittansen for diffus stråling er lavere enn for direkte stråling, burde den målte transmittansen være lavere enn dekkglassets virkelige transmittans for direkte stråling. Denne effekten av den diffuse strålingen er mest sannsynlig neglisjerbar i forhold til andre prosesser som gjør den målte transmittansen større eller mindre.

Stativet brukt for å måle transmittans utendørs var åpent på oversiden av pyranometeret. Her var det dermed en åpning hvor diffus stråling kunne nå pyranometeret. Den diffuse strålingen som kunne nå pyranometeret var på maksimalt $G_d = 144 \text{ W/m}^2$. Dette har sannsynligvis forstørret den målte transmittansen.

Hvilken av disse effektene som er viktigst for hvor stor den målte utendørs-transmittansen var, er uvisst.

5.1.4 Målte transmittanskurver sammenlignet med teoretisk transmittanskurve.

Den teoretiske transmittanskurven til dekkglasset der kun refleksjonstap er tatt hensyn til τ_r er vist i figur 4.7 og 4.9. Denne er beregnet med dekkglassets gjennomsnittlige brytningsindeks for stråling i solspekteret. Den totale transmittanskurven som også tar hensyn til absorpsjonstap er ikke plottet, fordi dempningskoeffisienten til polykarbonat er ukjent. Om det antas at dempningskoeffisienten til polykarbonat ligner den til glass, vil transmittanskurven til dekkglasset der kun absorpsjonstap er tatt hensyn til, ligne den for glass vist i figur 2.11. Denne viser at transmittansen som følge av absorpsjon er meget høy og endrer seg lite med innfallsvinkelen til strålingen. Dermed vil transmittanskurven der både refleksjonstap og absorpsjonstap er tatt hensyn til ligne kurven vist i figur 4.7 og 4.9, men være forminskert noe som følge av absorpsjonstap. Her er det ikke tatt hensyn til skilleveggene til dekkglasset.

Transmittanskurven funnet ved varierende høydevinkel funnet i *forsøk 5* og vist i både figur 4.7 og 4.9, har samme form som den teoretiske kurven. Det vil si at transmittansen holder seg så og si konstant fram til en høydevinkel på 60° , men synker raskt deretter. Grunnen til at denne kurven er lavere enn den teoretiske kommer nok av at innstrålingen delvis består av stråling med bølgelengde $\lambda > 3\mu\text{m}$, som dermed absorberes. I tillegg vil noe av strålingen med bølgelengder $\lambda < 3\mu\text{m}$ også bli absorbert. Noe stråling tapes også som følge av dekkglassets skillevegger. Dette tapet er ikke sterkt avhengig av høydevinkelen, og endrer dermed ikke formen på kurven.

Transmittanskurven funnet ved varierende azimutvinkel i *forsøk 11* og vist i figur 4.7 har en annen form enn den teoretiske kurven. Denne kurven begynner å synke ved en lavere innfallsvinkel enn kurven ved varierende høydevinkel. Likevel ser det ut som kurven synker raskere ved azimutvinkler større enn 60° enn ved azimutvinkler mindre enn 60° . Grunnene til at denne kurven er lavere enn den teoretiske, er de samme som for kurven tilhørende *forsøk 5*. Grunnen til at kurven tilhørende *forsøk 11* synker tiddligere enn ved *forsøk 5* er diskutert i kapittel 5.1.1.

For transmittansene målt utendørs i *forsøk 9* og *10*, vist i figur 4.9, er det ikke gjort målinger for vinkler større enn 60° . Dermed viser ikke disse kurvene det samme skille ved 60° innfallsvinkel på strålingen, der transmittansen begynner å synke raskt, som forsøkene gjort innendørs. Det ser likevel ut til å være samme tendens som innendørs når det gjelder at transmittansen synker raskere ved økt azimutvinkel enn ved økt høydevinkel.

5.2 Usikkerhet ved målinger

I kapittel 3.2 ble feil ved laboppsettet undersøkt. Basert på undersøkelser gjort ble det slått fast at usikkerhetene ved laboppsettet var så små at de ikke trengtes å tas mer hensyn til, annet enn at laboppsettet ble forsøkt holdt uendret i løpet av et forsøk. Dette gjelder variasjon av målinger som følge av usikkerheten til lysboksens vinkel i forhold til pyranometeret, pyranometerets avstand til lysboksen, innkommende diffus stråling på pyranometeret og pyranometerets plassering langs lysboksens breddedeakse. Flere undersøkelser av usikkerhet ved laboppsettet kunne muligens vært gjort.

Den viktigste effekten av små endringer av laboppsettet viste seg å være pyranometeravstanden. En liten endring av pyranometeravstanden ga utslag på pyranometeret og medfører dermed en usikkerhet.

Det antas at usikkerheten ved laboppsettet gir utslag på de målte transmittansene ved at transmittanskurvene målt ikke er helt glatte. Transmittansen hopper smått opp og ned langs kurvene målt. Det antas også at usikkerheten ved laboppsettet ikke var systematisk, og dermed gir utslag like mye i positiv retning som negativ retning for de målte transmittansene.

I tillegg ble det senere oppdaget at dekkglassets avstand til pyranometeret hadde mye å si for intensiteten målt av pyranometeret. Basert på dette ble en enkelt avstand mellom dekkglasset og pyranometeret valgt som standard for resten av forsøkene. Denne avstanden kunne blitt valgt annerledes, hvilket ville gitt andre målte transmittanser. Selve størrelsen på transmittansene målt ved forsøk in-

nendørs i denne oppgaven, kan dermed ikke sies å være den sanne størrelsen til dekkglassets transmittans, fordi den er avhengig av valgt avstand mellom dekkglasset og pyranometeret. Som figur 4.3 viser, var forskjellen i målt transmittans $\Delta\tau = 0,08$, ved endring av dekkglassavstand på 20 cm. Basert på variasjonen av målt transmittans som følge av dekkglassets avstand til pyranometeret, kan andre usikkerheter som følge av laboppsettet anses som uviktige.

Den nyttige informasjonen som kan leses av transmittanskurvene målt i denne oppgaven, er dermed ikke et eksakt tall på dekkglassets transmittans, men kun en antydning til transmittansens størrelse. I tillegg viser transmittanskurvene funnet hvordan transmittansen endrer seg med økt azimutvinkel kontra økt høydevinkel, og hvordan de skiller seg fra den teoretiske transmittanskurven.

5.3 Dekkglasset som en del av en solfangermodul

Til nå er transmittansen til dekkglasset diskutert fra et laboratorieperspektiv, uten å fokusere på dekkglasset som en del av en solfanger. I et solfangeranlegg, for eksempel på taket av et hus, er dekkglasset en viktig del som er ment til å minke strålings- og konveksjonstap. Dermed må dekkglasset også diskuteres med fokus på dets rolle i en solfangermodul.

5.3.1 Tap fra en solfanger

Transmittanskurvene funnet ved forsøk i denne oppgaven, sier noe om de optiske tapene som forventes ved bruk av dette dekkglasset på en solfanger. Når stråling har en lav innfallsvinkel forventes det at omtrent 60% til 70% av den innkommende strålingen transmitteres gjennom dekkglasset (som vist i figur 4.7 og 4.9). Dekkglasset bidrar dermed med et optisk tap på 30% til 40% av den innkommende effekten, når strålingen har en lav innfallsvinkel. De totale optiske tapene består også av refleksjon fra solfangerens absorbator. Dette bidraget til det optiske tapet er avhengig av valg av absorbator og selektivt belegg på absorbatoren.

Hvor godt dekkglasset undersøkt i denne oppgaven minker strålings- og konveksjonstap er uvisst. Figur 2.5 indikerer at for stråling ved en gitt innfallsvinkel, vil de optiske tapene fra en solfanger være uavhengig av innstrålingens intensitet, og av temperaturforskjellen mellom absorbatorens gjennomsnittstemperatur og temperaturen til omgivelsene. Dette gjelder derimot ikke konveksjonstap og strålingstap. Temperaturen til absorbatoren blir høyere jo høyere innstrålingsintensiteten på en

solfanger er, og strålings- og konveksjonstapene blir større jo større temperaturforskjellen mellom gjennomsnittstemperaturen til absorbatoren og omgivelsene er. Figur 2.5 er ikke direkte sammenlignbar med en solfanger med dekkglasset undersøkt i denne oppgaven, fordi de optiske tapene er i figur 2.5 lavere enn de observert med dekkglasset fra Rodeca.

Figur 2.5 viser at varmetapene typisk er større enn de optiske tapene ved en høy temperaturforskjell mellom absorbatoren og omgivelsene. Ved en lav temperaturforskjell mellom absorbatoren og omgivelsene dominerer de optiske tapene. I figur 2.5 er de optiske tapene på omtrent 17% ved en temperaturforskjell på 100 °C mellom absorbatoren og omgivelsene, mens varmetapene er på omtrent 43% ved samme temperaturforskjell. Ved bruk av dekkglasset fra Rodeca, ville de optiske tapene vært større. Det kan hende at de negative effektene ved å bruke dekkglasset fra Rodeca (at transmittansen er relativt lav) nulles ut av en minkning av strålings- og konveksjonstapene, ved en høy temperaturforskjell mellom absorbatoren og omgivelsene. Dette er uvisst helt til strålings- og konveksjonstapene gjennom dekkglasset er undersøkt.

5.3.2 Orientering av dekkglasset

Dekkglasset undersøkt i denne oppgaven kan monteres i to orienteringer på en solfangermodul. Enten kan dekkglasset monteres slik at skilleveggene står vertikalt, eller slik at de står horisontalt. Hvilken orientering av dekkglasset som lønner seg, vil avhenge av blant annet lokasjon på jordkloden, lokale geografiske forhold, og ønsket bruk av solfangeren.

For enkelhets skyld diskuteres her en situasjon hvor en solfangermodul står sørvendt på den nordlige halvkulen og på et flatt område uten skyggende hindringer for solinnstrålingen (det vil si uten for eksempel trær eller fjell som påvirker situasjonen). I løpet av et døgn vil innstrålingsintensiteten i denne situasjonen være størst når sola står i sør (det vil si ved azimutvinkel på 0°). Hvilken høydevinkel sola er ved når den står i sør, varierer i løpet av året. Solas høydevinkel ved azimutvinkel $\beta = 0^\circ$ er størst ved sommersolverv, og minst ved vintersolverv.

Om solfangeren er rettet mot sør, vil solas azimutvinkel også være azimutvinkelen til strålingen som treffer solfangeren. En solfanger vil være montert ved en bestemt høydevinkel. Det vil si at solfangerens normalvektor vil ha en bestemt vinkel over bakken. Sola vil i løpet av et døgn, og i løpet av året endre høydevinkelen den står i. For en solfanger vil forskjellen mellom solfangerens høydevinkel og solas høydevinkel, være vinkelen som har noe å si for dekkglassets transmittans. Denne forskjellen blir heretter kaldt høydevinkelforskjellen. Høydevinkelen til sola blir her

spesielt diskutert ved situasjonen der sola står i sør. Dette fordi det er når sola står i sør det er størst potensiale til å sanke energi, og fordi høydevinkelforskjellen varierer med tiden på året.

Det meste av tiden har sola både en azimutvinkel og en høydevinkel i forhold til solfangeren. Dekkglassets transmittanskurve i løpet av en dag vil være avhengig av både azimutvinkelen og høydevinkelen til sola. Dekkglassets transmittans når sola står i en bestemt azimutvinkel og høydevinkel, vil være en kombinasjon av transmittanskurvene funnet ved varierende azimutvinkel og høydevinkel i denne oppgaven. Det kan tenkes at solas azimutvinkel og høydevinkel gir hvert sitt bidrag til den totale transmittansen. Slik kan transmittansen som følge av azimutvinkel og høydevinkel diskuteres hver for seg, med det faktum i baktankene at den totale transmittansen vil være en kombinasjon av de to.

Dekkglasset montert med vertikale skillevegger

Først tenkes en situasjon der dekkglasset er montert med vertikale skillevegger. Transmittansen som følge av solas azimutvinkel vil da stige fra soloppgang til sola står i sør, og minke fra sola står i sør til solnedgang. Denne transmittansen vil være lav for høye azimutvinkler og høy for lave azimutvinkler (i absoluttverdi), slik kurven tilhørende *forsøk 11* i figur 4.7 viser. Når sola står i sør, vil transmittansen som følge av høydevinkel vil være høy når høydevinkelforskjellen mellom sola og solfangeren er liten. Transmittansen som følge av solas høydevinkel vil variere lite så lenge høydevinkelforskjellen mellom sola og solfangeren er under 60° , som kurven tilhørende *forsøk 5* i figur 4.7 viser. Høydevinkelforskjellen når sola står i sør vil ikke variere så mye som 60° i løpet av et år. Derfor vil dekkglassets transmittans være god når sola står i sør, uavhengig av tiden på året når dekkglasset er montert med vertikale skillevegger. Ved solen i en lav azimutvinkel og høydevinkel, vil transmittansen som følge av azimutvinkel dominere.

Dekkglasset montert med horisontale skillevegger

Deretter tenkes en situasjon der dekkglasset er montert med horisontale skillevegger. Transmittansen som følge av solas azimutvinkel vil også i denne situasjonen stige fra soloppgang til sola står i sør, og minke fra sola står i sør til solnedgang. Den vil stige raskt fram til en azimutvinkel på -60° , og deretter forbli nesten konstant høy fram til en azimutvinkler på 60° . Transmittanskurven som følge av azimutvinkel vil ha samme form som kurven tilsvarende *forsøk 5* i figur 4.7. Høydevinkelforskjellen mellom sola og solfangeren vil være liten ved lave azimutvinkler. Når sola står i sør, vil transmittansen som følge av høydevinkel variere

betraktelig med tiden på året. Transmittanskurven som følge av høydevinkel når sola står i sør vil ha samme form som kurven tilsvarende *forsøk 11* i figur 4.7. En liten økning av høydevinkelforskjellen mellom sola og solfangeren vil senke dekkglassets transmittans. Dekkglassets transmittans vil være på sitt maksimum kun de to gangene i løpet av året der høydevinkelforskjellen mellom sola og solfangeren er 0° . For lave azimutvinkler og høydevinkler vil transmittansen som følge av høydevinkel dominere.

Effekten av lokasjonens breddegrad

I Norge er potensialet for sanket energi lavt når sola har høy azimutvinkel (i absoluttverdi) og dermed lav høydevinkel, men høyt når sola har lav azimutvinkel og høy høydevinkel. Derfor burde i Norge dekkglasset monteres med vertikale skillevegger, for å få sanket mest mulig energi over hele året ved forskjellige maksimale høydevinkler. Energien som ville blitt sanket ved azimutvinkler $\beta > 60^\circ$ ville vært lav uansett, og det gjør dermed ikke noe at transmittansen er lav i disse situasjonene. Det er mer kritisk å ikke tape energi når potensialet er stort, altså ved lave azimutvinkler.

Ved ekvator varierer ikke solas høydevinkel midt på dagen seg noe særlig i løpet av året. Her vil det være mer gunstig å montere dekkglasset med horisontale skillevegger, for å sørge for stor energisanking også ved lave azimutvinkler.

Dekkglassets design

Med tanke på dekkglassets design burde dekkglasset monteres med vertikale skillevegger i områder med en betydelig mengde nedbør. Dette kommer av koblingsmekanismen mellom ett dekkglass og det neste i rekken. Om dekkglasset monteres med vertikale skillevegger er det lite sannsynlig at vann vil trenge gjennom dekkglasset ved koblingsmekanismen. Med dekkglasset montert med horisontale skillevegger er det fare for at vann trenger gjennom dekkglasset ved koblingsmekanismen.

5.4 Videre arbeid og anbefalninger

5.4.1 Forbedring av målemetode

På grunn av den store usikkerheten ved målingene gjort i denne oppgaven, som følge av dekkglassets avstand til pyranometeret, og av lystemperaturen til lypære-

ne som ikke tilsvarer solstrålingens lystemperatur, anbefales det å utvikle en bedre målemetode for å måle et dekkglass' transmittans. Viktige ting som burde vurderes er hvordan håndtere spredningen av stråling fra dekkglasset, og lystemperaturen til strålingen brukt.

Dekkglassets avstand til pyranometeret

Siden dekkglasset sprer stråling, målte ikke pyranometeret effekten av all stråling som ble transmittert gjennom dekkglasset i denne oppgaven. For å forbedre dette kunne det vært en idé å unngå å ha en avstand mellom dekkglasset og pyranometeret, og sette pyranometeret helt inntil dekkglasset. Da ville en større andel av den spredte strålingen blitt observert av pyranometeret.

Lyskilde

Strålingskilden brukt i denne oppgaven burde byttes ut med en lyskilde som emitterer stråling med en lystemperatur nærere solstrålingens lystemperatur. Denne lyskilden kunne for eksempel vært solen, altså at målinger av transmittans ble gjort utendørs med sola som strålingskilde. Dette vil gi transmittansmålinger nærere den virkelige transmittansen til dekkglasset slik den er når dekkglasset er montert på en solfangermodul.

Lysboks

Lysboksen i denne oppgaven hadde refleksive flater på innsiden. Hensikten med dette var at strålingen skulle blande seg, og være homogen når den forlot lysboksen. I denne situasjonen vil ikke strålingen nå dekkglasset ensretta, men vil bestå av stråling som kommer med en rekke vinkler. For å unngå dette kunne lysboksen vært droppet, slik at kun strålingen som er omtrent ensretta ville nådd pyranometeret. I så fall ville rommet der målingene blir gjort blitt lyst opp, og dette kunne gjort utslag for diffus stråling målt av pyranometeret. Et alternativ er å ha et absorberende belegg på innsiden av lysboksen slik at stråling ikke blir reflektert. Dermed er strålingen som forlater lysboksen kun den som ikke har berørt lysboksens innside.

Noe annet som kunne vært gjort er å ha en ugjennomsiktig plate med en liten apertur foran lysboksåpningen, slik at all strålingen som når pyranometeret må gå gjennom aperturen. Dette vil føre til mer ensretta lys, men lavere målte intensiteter av pyranometeret.

Forsøk gjort utendørs

En stor usikkerhet ved forsøkene gjort utendørs var at diffus stråling nådde pyranometeret fra den åpne oversiden til stativet brukt. Dette gjorde mest sannsynlig utslag på den målte transmittansen. Denne delen av stativet kunne vært tildekket, slik som de andre sidene av stativet var. Dermed ville pyranometeret vært inne i en lukket boks, der stråling kun ville nådd innsiden gjennom dekkglasset.

5.4.2 Måling av strålings- og konveksjonstap gjennom dekkglasset

Energi tapes gjennom dekkglasset både som optiske tap, strålingstap og konveksjonstap. For å kunne si noe om de optiske tapene ved bruk av dekkglasset er for store eller ikke, må de optiske tapene kunne sammenlignes med strålings- og konveksjonstapene. Derfor er det også behov for målinger av strålingstap gjennom dekkglasset, og konveksjonstap fra dekkglasset. Hvis disse tapene er mindre ved bruk av dekkglasset fra Rodeca enn alternative dekkglass, kan dette gjøre opp for at dekkglasset fra Rodeca har lavere transmittans. I tillegg må målinger av optiske tap, strålingstap og konveksjonstap gjøres på alternative dekkglass, for å kunne konkludere at dekkglasset fra Rodeca er bedre eller dårligere enn andre alternativ.

5.4.3 Matematisk undersøkelse av energisanking

Om transmittanskurven til dekkglasset fra Rodeca er kjent, kan det gjøres en matematisk beregning av den totale tilgjengelige energien til absorbatoren i løpet av et år. For å gjøre dette må solbanen over himmelen være kjent for den aktuelle lokasjonen for alle dagene i året, samt strålingsintensiteten ved alle tidspunkt i året og transmittanskurvene til dekkglasset. Det er trolig også mulig å finne ut ved hvilken breddegrad det energimessig lønner seg å snu orienteringen til dekkglasset fra vertikale til horisontale skillevegger. Dette vil være en komplisert matematisk jobb som består av en rekke integraler.

5.4.4 Valg av dekkglass

Som resultatene viser synker transmittansen raskere ved økt azimutvinkel enn ved økt høydevinkel. Denne forskjellen kommer av dekkglassets skillevegger. Forskjellen mellom azimutvinkelkurvene og høydevinkelkurvene kunne vært mindre hvis

det var færre skillevegger i dekkglasset. Ved en halvering av antall skillevegger i dekkglasset ville andelen av den innkommende strålingen som må bevege seg gjennom en skillevegg også blitt halvert (dette gjelder så lenge ingen stråling må gå gjennom to skillevegger). Dette ville trolig gjort store forskjeller i transmittans-azimutvinkel-kurven til dekkglasset.

Kapittel 6

Konklusjon

6.1 Målt transmittans

Transmittansen til dekkglasset fra Rodeca målt i denne oppgaven viser verdier mellom 0,60 og 0,70, men er forbundet med en del usikkerhet. Den målte transmittansen var avhengig av blant annet valgt avstand mellom dekkglasset og pyranometeret, og lystemperaturen til innstrålingen. Ved målinger av transmittans innendørs varierte den målte transmittansen rundt 0,60 for innstråling ved innfallsvinkel på 0° . Transmittansen målt utendørs med sola som strålingskilde var høyere enn den målt innendørs med lyspærer som strålingskilde. Ved målinger utendørs varierte den målte transmittansen rundt 0,70 for innstråling ved innfallsvinkel på 0° . Ved forsøk utendørs var diffus stråling en viktig feilkilde, som mest sannsynlig økte den målte transmittansen over den virkelige verdien. Dermed har den virkelige transmittansen til dekkglasset trolig en verdi mellom 0,60 og 0,70 for stråling i solspekteret.

Transmittans-innfallsvinkel-kurvene funnet i denne oppgaven viser at dekkglassets transmittans synker med økt innfallsvinkel på innstråling. Transmittansen synker sakte med økt innfallsvinkel opp til en innfallsvinkel på $\theta = 60^\circ$ og synker deretter raskt. Dette stemmer overens med teoretiske transmittans-innfallsvinkel-kurver.

Transmittans-innfallsvinkel-kurven synker raskere ved økt asimutvinkelforskjell mellom innstrålingen og dekkglasset enn ved økt høydevinkelforskjell mellom innstrålingen og dekkglasset (her antas det at dekkglasset er montert med vertikale skillevegger). Forskjellen mellom transmittansen som følge av azimuthvinkel og transmittansen som følge av høydevinkel, kommer av skilleveggene i dekkglasset. Skilleveggene fører dermed til et større optisk tap for en solfanger, enn om skille-

veggene ikke hadde vært tilstede. Om dekkglasset hadde hatt færre skillevegger, ville forskjellen mellom transmittansen som følge av azimutvinkel og som følge av høydevinkel vært mindre, og de optiske tapene ville vært lavere.

Selv om selve verdien av transmittansene funnet i denne oppgaven er usikre, vil de sanne transmittans-innfallsvinkel-kurvene ha samme form som transmittans-azimutvinkel-kurvene og transmittans-høydevinkel-kurvene funnet i denne oppgaven.

Med den forskjellen som finnes mellom azimutvinkelkurven og høydevinkelkurven til dekkglassets transmittans anbefales det å montere dekkglasset med vertikale skillevegger på et solfangeranlegg i Norge, for å få sanket mest mulig energi i løpet av et år. Det anbefales også at dekkglasset monteres med vertikale skillevegger for å unngå lekkasje gjennom skilleveggene ved regn.

6.2 Målemetode

Målemetodene benyttet i denne oppgaven medførte store usikkerheter. Transmittansene funnet ved forsøk i denne oppgaven kan dermed ikke anses som den virkelige transmittansen til et dekkglass i bruk på et solfangeranlegg, men kun en antydning på dens størrelse. Denne usikkerheten kommer hovedsakelig av at valgt avstand mellom dekkglasset og pyranometeret påvirker den målte transmittansen, og at lystemperaturen på lyspærene benyttet innendørs ikke er den samme som solstrålingens lystemperatur. Ved forsøkene gjort utendørs, fører den diffuse strålingen som kan nå pyranometeret fra oversiden av stativet benyttet, til en stor usikkerhet.

Det anbefales derfor å utvikle en bedre målemetode som særlig tar hensyn til strålingskildens lystemperatur og spredning av stråling fra dekkglasset.

6.3 Optiske tap, sammenlignet med andre tap

Det går ikke an å konkludere om dekkglasset fra Rodeca er et godt dekkglass å bruke på et solfangeranlegg, før strålingstapet og konveksjonstapet gjennom dekkglasset er undersøkt. Forholdet mellom disse to tapsmekanismene og det optiske tapet ved dekkglasset, vil være det som avgjør om dekkglasset er godt egnet for solfangere eller ikke. Siden dekkglasset fra Rodeca medfører et relativt stort optisk tap, må strålingstapene og konveksjonstapene være relativt små, for at det skal lønne seg å benytte dette dekkglasset i et solfangeranlegg.

Bibliografi

- [1] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz og C. Pout, «A review on buildings energy consumption information», *Energy and buildings*, årg. 40, nr. 3, s. 394–398, 2008.
- [2] N. Feilber og B. Grinden, *Ny kunnskap om fordeling av strømforbruket*, 2006.
- [3] (2012). Energibruk i husholdningene, side: <https://www.ssb.no/statbank/table/10573/> (sjekket 10.05.2019).
- [4] Drake Landing Solar Community. (2017). Welcome to Drake Landing Solar Community, side: <https://www.dlsc.ca/> (sjekket 10.05.2019).
- [5] P. H. Heyerdahl, *Personlig samtale med Heyerdahl, P. H.* 10. mai 2018.
- [6] F. Giovannetti, S. Föste, N. Ehrmann og G. Rockendorf, «High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: applications and performance», *Solar energy*, årg. 104, s. 52–59, 2014.
- [7] T. Matuska, *Analysis of Solar Flat-plate Collectors*, 24. mar. 2015.
- [8] V. Quaschnig. (2004). Solar Thermal Water Heating. Figur 3, side: <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals4/index.php> (sjekket 01.05.2019).
- [9] J. A. Duffie, W. A. Beckman og W. Worek, «Solar engineering of thermal processes», i, 3. utg. Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, 2006, kap. 1, 2, 3, 4, 5, 6, s. 1–323.
- [10] M. Abramowitz og M. W. Davidson. (). Color Temperature, side: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/lightandcolor/colortemp/> (sjekket 01.05.2019).
- [11] O. Engvold. (30. apr. 2019). Sola, side: <https://snl.no/Sola> (sjekket 01.05.2019).
- [12] P. Tsilingiris, «Comparative evaluation of the infrared transmission of polymer films», *Energy conversion and management*, årg. 44, nr. 18, s. 2839–2856, 2003.
- [13] N. R. (). Blue Sky, Rayleigh Scattering, side: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html> (sjekket 12.05.2019).

- [14] —, (). Blue Sky, Mie Scattering, side: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html#c3> (sjekket 12.05.2019).
- [15] Rodeca. (7. nov. 2018). Techninal Data. Dekkglass PC 2610-4, side: <https://www.rodeca.de/en/products/multi-function-panels/technical-data.html> (sjekket 02.05.2019).

Takk.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway