

Arkitektoniske eksperimenter

Design med viden om lys – et multidimensionalt design element

Ph.d. afhandling indleveret til bedømmelse ved Det Tekniske Naturvidenskabelige Fakultet, Institut for Arkitektur og Medieteknologi på Aalborg Universitet, december 2013.

Ellen Kathrine Hansen

ekh@create.aau.dk

Copyright 2013, Ellen Kathrine Hansen, Aalborg Universitet

(Fortryk til bedømmelse)

Arkitektur & Design (A&D Files)

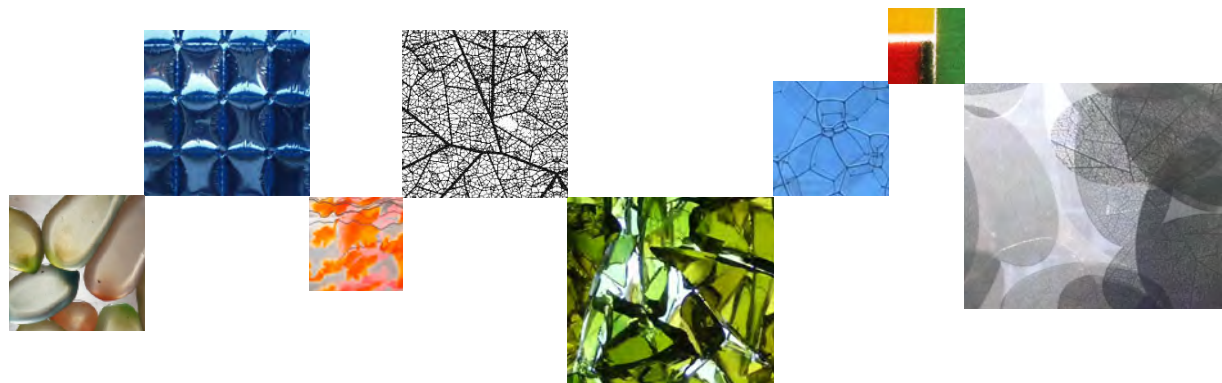
ISSN nr. 1603-6204

Volumen nr. 79



AALBORG UNIVERSITY
COPENHAGEN

Forside illustration og illustrationer i skilleark er forsøg med lys og skygge udtrykt gennem materialer fra afhandlingens eksperimenter udført af studerende ved Arkitektskolen Aarhus og Kunstakademiets Arkitektskole.



Vejleder:

Michael Mullins, Lektor, Ph.d., Aalborg Universitet

Bedømmelsesudvalg:

Lise Busk Kofoed, Professor Aalborg Universitet
(formand for bedømmelsesudvalget)

Anne Beim, Professor, Ph.d., Det Kongelige Danske
Kunstakademis Skoler for Arkitektur, Design og
Konservering - Arkitektskolen

Lotte Bjerregaard, Lektor, Ph.d., Danmarks Tekniske Universitet

RESUMÈ

Visionen om at skabe balance mellem den energi vi producerer og forbruger har skabt ambitiøse energimål og -bestemmelser i byggelovgivningen og derved fremskyndet udviklingen af nye teknologier og komponenter. Det har medført øget fokus på kvantitative værdier i processen mod at designe energioptimeret byggeri. Der er behov for at inddrage og udvikle kvalitative arkitektoniske værdier gennem nye transdisciplinære design-processer. Processer, hvor teknisk viden kombineres med en kulturel indlevelse i en "hybrid imagination", processer hvor videnskabelige og kreative metoder forenes gennem eksperimentet, der kan designe med flere kriterier. I afhandlingen diskuteres det, hvordan dette kan gøres med lys som et multidimensionelt design element gennem arkitektoniske eksperimenter.

Afhandlingen adresserer spørgsmålet om, hvordan viden om lys fra forskellige fagområder kan motivere en kreativ design proces og generere ny viden, der understøtter en bæredygtig udvikling.

Afhandlingen er motiveret af min erfaring fra tre tværfaglige eksperimenter, udført i perioden 2001-2011, som forsker og underviser på arkitektuddannelser og som projektleder i byggeindustrien. Gennem disse eksperimenter er der udviklet metoder til at samarbejde på tværs af forskning, uddannelse, industri, tekniske udviklingsmiljøer og praksis i processen mod at udvikle nye energiproducerende teknologier, komponenter og bygninger med arkitektoniske potentialer.

Eksperimenterne fra disse tidligere projekter er brugt som empirisk materiale i afhandlingen. Observationer af processer og metoder fra eksperimenterne er systematiseret og sammenstillet med teorier om arkitektur, design, innovation og bruger adfærd og sammenfattet i en teoretisk proces model. Modellen demonstrerer, hvordan viden fra forskellige fagområder, kulturer og funktioner indarbejdes ved at definere forskellige kriterier samt benytte forskellige metoder for at sammenstille og syntetisere værdierne gennem design af modeller og mock-ups. Lys er centralt som et multidimensionelt design element, der udfoldes i en kreativ proces så det på en gang producerer energi og tilføjer arkitektoniske værdier.

For at understøtte problemområdet vedrørende udvikling af viden gennem design i et tværfagligt miljø demonstrerer de tre eksperimenter og de understøttende teorier, at forskning fra forskellige traditioner kan integreres i de individuelle kriterier i projekterne. Således er det muligt i den samme proces, at arbejde med hypoteser, der testes parallelt i de tre kriterier med baggrund i teknisk/naturvidenskabelig, samfundsvidenskabelig og kunstnerisk/humanistisk forskningstradition.

Intentionen er, at afhandlingen bidrager med diskussioner og en metode demonstreret gennem en proces model, der kan inddrages bredt i forskellige forsknings, undervisning og udviklingsmiljøer. Modellen skal bidrage til at udviklingen af byggeriet, øger fokus på mulighederne i tværfagligt samarbejde generelt og specifikt på udnyttelsen af den naturlige ressource dagslyset – en energikilde og et arkitektonisk potentiale.

Dette er en Ph.d. afhandling 'uden forudgående studier', hvilket betyder at publikationer fra tidligere arbejde indgår i bedømmelsen.

SUMMARY

The vision of creating balance between the consumption and production of energy in our build environment has created ambitious energy targets and requirements in the building regulations, which has accelerated the development of new energy optimized technologies and components. This has increased the focus on quantitative values in the process of designing energy optimized buildings. There is a need to focus on user aspects and qualitative values by retaining architectural qualities through transdisciplinary design processes: processes where scientific and technical knowledge is mixed with cultural awareness in a "hybrid imagination", processes where scientific and creative methods are united through designing with several criteria. In the thesis it will be discussed, how this can be done using light as a multidimensional design element in architectural experiments.

The thesis is motivated by my experience from a number of interdisciplinary architectural experiments, which I have realized in the period 2001-2011 as a researcher and teacher at schools of architecture and as a project manager in the construction industry. Through these I have developed methods, concepts for collaboration, cross-disciplinary research, education, industry, technology, developmental environments and practice in the process of developing energy producing technologies, components and buildings with architectural potentials.

Three experiments from my previous work are used as the empirical material in the thesis to demonstrate: a model to collaborate and incorporate knowledge from a diversity of fields by defining criteria and visions, constructions and various methods for compiling and synthesizing the values. In all three experiments light is central as a multidimensional design element, both to produce energy and add architectural values.

The theory in the thesis is drawn from knowledge from different fields such as architecture, innovation, design and anthropology to form a multidisciplinary theoretical platform discussing how to mix and transform knowledge through experiments.

The thesis thus addresses the question, how can knowledge of light from different disciplines support a creative design process and generate new knowledge, which supports a sustainable development?

To approach the problem area of the development of knowledge through design in a transdisciplinary environment, the three experiments and the supporting theories demonstrate that research from different traditions can be integrated with distinct criteria in the projects. It is thus possible, in the same process, to work with hypotheses that are tested in parallel with the three criteria on the basis of technical/scientific, social science and art/humanities traditions.

It is intended that the outcome takes the form of generalized discussions, principals and concepts that can be adapted to individual development and educational progress and thereby create added value in sustainable living environments with focus on the natural resource of daylight – an energy source and an architectural potential.

This is a PhD thesis 'without previous studies', which means that publications from previous work are part of the thesis and will be included in the assessment.

FORORD

Når jeg tænker tilbage på mine tidligere projekter, bærer de præg af den kunstneriske tradition jeg har fået med mig gennem uddannelse fra Kunstakademiets Arkitektskole i København og ansættelse gennem 12 år på Arkitektskolen Aarhus. Projekterne er drevet af et stort engagement og troen på, at det kan lykkedes at forene tekniske og kunstneriske miljøer gennem den arkitektoniske skabelsesproces. Jeg husker en tid, hvor der i mindre grad end i dag blev fokuseret på at processer og metoder skulle forankres i videnskabelige evidens baserede tilgange. Derimod var der en skøn eksperimenterende, legende og engageret tilgang, som er helt grundlæggende for det at lære og det at skabe. Men også en tid, hvor der opstod en lyst til at udfordre den akademiske arkitektfaglige disciplin ved at kombinere faget med tekniske og kommercielle kulturer indenfor byggeriet. Det førte til 9 års ansættelse i byggeindustrien, hvor jeg har fået unikke muligheder for at eksperimentere, ikke blot via workshops og mock-ups men med virkelige bygninger til virkelige brugere. Her kunne jeg trække på den fantastiske vidensbank der var i de forskellige forretningsområder i firmagruppen VKR Holding og derved for alvor se synergien i at sammenstille, ikke blot viden på tværs af tekniske og kunstneriske udviklingsmiljøer, med også på tværs af industriens parter og ikke mindst værdien i at syntetisere denne viden gennem det byggede eksperiment med brugeren som omdrejningspunkt.

Jeg ser store potentialer i at fastholde og udvikle denne type eksperimenter, især i et bæredygtighedsperspektiv, hvor lyset bliver et central tværgående design element med uudtømmelige potentialer. Men jeg oplever, at det er svært at kommunikere erfaringer og viden ud over en fortælling om oplevelserne fra de enkelte eksperimenter, som jeg til gengæld har fortalt uendeligt mange gange til meget forskellige faggrupper og nationalt som internationalt. Jeg ser potentialer i at der i højere grad fokuseres på at dele og transformere viden gennem eksperimenter. Derfor vil jeg gerne skabe en videnskabelig dokumentation for, hvordan eksperimenterne bliver baseret på viden og samtidig skaber viden, der kan føres tilbage til de respektive parter i projektet og ud i nye miljøer. Det er mødet mellem denne akademiske, videnskabelige tilgang og det legende, praksisrelaterede og eksperimenterende jeg vil afsøge igennem denne afhandling.

Så nu sidder jeg her på institut for Arkitektur og Medieteknologi på Det Tekniske Naturvidenskabelige Fakultet på Aalborg Universitet - i København. Gennem det sidste år har jeg stiftet bekendtskab med teorier på tværs af fag og fakulteter, for nu at udforske min tværfaglige tilgang! Jeg håber denne videnskabelige indsprøjtning vil demonstrere, at det er muligt at lave en afhandling, der er videnskabelig uden at miste den legende og oplevede tilgang. Jeg håber også, at modtagerne af afhandlingen motiveres til at bygge bro mellem de videnskabelige, kunstneriske og kommercielle miljøer ved at udfolde lysets potentialer gennem arkitektoniske eksperimenter. Vores byggede miljø er for vigtigt til ikke at udvikle det sammen.

København, december 2013

Ellen Kathrine Hansen

TAK

Jeg vil gerne takke Aalborg Universitet for at optage mig som Ph.d. studerende og særligt Michael Mullins for at se denne mulighed og supportere mig såvel fagligt som mentalt i den koncentrerede proces. Tak også til Mary-Ann Knudstrup, Nanet Mathiasen og Gitte Marling, der har bidraget med motiverende og skarp vejledning. Herudover vil jeg gerne sige tak til de kursusledere, der har ført mig ind i nye faglige verdener. En særlig tak til Andrew Jamison, Kirsten Gram-Hansen, Søren Kerndrup, der guidede til at knytte min faglighed til deres.

Til alle de fantastiske samarbejdspartnere, kolleger og studerende, der har været med til at gennemføre de projekter, der har dannet baggrunden for denne afhandling, vil jeg sige, at det har været en sand fornøjelse at dykke ned i projekterne og genopleve de gode stunder vi havde sammen.

Kim Martinussen, tak fordi du tog hånd om at få afhandlingen til at fremstå så smuk.

Endelig skal hele familien have en stor tak for jeres tålmodighed.

PUBLISEREDE ARTIKLER

1. ARKITEKTONISKE EKSPERIMENTER – design med viden om lys, et multidimensionalt design element.

2. Ellen Kathrine Hansen, PhD studerende

3. Michael Mullins, Lektor

4. Publicerede artikler:

Paper [1] Hansen, E.K., Gylling, G., Mullins, M., 2013, “*Home smart Home A Danish Energy Positive Home Designed with Daylight*”, IEEE, Proceedings. Special Issue “Smart Homes” p. 2436-2449 Invited Paper, The Institute of Electrical Engineers, Inc. New York, U.S.A. ISSN 0018-9219

Paper [2] Hansen, E.K., Gylling, G., 2011. “*The Window – a Poetic Device and Technical Tool to Improve Life in Energy Positive Homes – a Case Study of an Active House*”. World Sustainable Building Conference, SB11, Helsinki.

Paper [3] Hansen, E.K., “*Dagslys og energioptimering i boligen*”. 2010a, s. 34-37. I Larsen T. S., Sælan, A., Hansen, E. K., Aggerholm, S. *Energiparcel - 4 eksempler på energirenovering af danskernes yndlingsbolig*. Realia A/S. ISBN 978-87-92230-26-3

Paper [4] Hansen, E.K. 2010b, “*Denmark’s net-zero energy home*”. In IEEE Spectrum Technology, The Magazine of Technology Insiders Engineering and Science News, Vol. 47, no. 8.10 p. 34-38, The Institute of Electrical Engineers, Inc. New York, U.S.A.

Paper [5] Hansen, E.K., 2008a. “*Den transparente energiproducerende glasfacade*”, s. 18-25. I Hansen, E.K. m.fl. *Lys+energi+arkitektur*, Arkitektskolen Aarhus

Paper [6] Hansen, E.K., 2008b. *Matrix, metode til karakterisering*, s.10-17. I Hansen, E.K. m.fl. “*Lys+energi+arkitektur*”, Arkitektskolen Aarhus

Paper [7] Hansen, E.K. 2008c. *Solceller – et udviklingsperspektiv*, s. 26-29, 4 s. I Hansen, E.K. m.fl. *Lys+energi+arkitektur*, Arkitektskolen Aarhus

Paper [8] Hansen, E.K., 2005. *Udvikling og visioner*. s.81-99. I Berg, M., Hansen, E.K., Kappel, K., Lehrskov, H., *Solceller + arkitektur – en guide til anvendelse af solceller i byggeriet*, Arkitektens Forlag. København

Paper [9] Hansen, E.K., 2002. *Fra Rumteknologi til Bygningskomponent – om udviklingen i solcelleteknologien*. Arkitekten vol. 22, s. 2-6. Arkitektens Forlag. København

Paper [10] Hansen, E.K., 2001. *SOLcelle og SOLlys – et arkitektonisk potentiale. Idégrundlag for hvordan solceller og sollys kan spille sammen*. Arkitektskolen Aarhus.

This thesis has been submitted for assessment in partial fulfillment of the PhD degree. The thesis is based on the submitted or published scientific papers which are listed above. Parts of the papers are used directly or indirectly in the extended summary of the thesis. As part of the assessment, co-author statements have been made available to the assessment committee and are also available at the Faculty. The thesis is not in its present form acceptable for open publication but only in limited and closed circulation as copyright may not be ensured.

LÆSEVEJLEDNING OG DISPOSITION

Afhandlingen består af fire dele, der behandler hhv. baggrund, empiri, teori og modellen. I disse kapitler afsøges problemstillingen og der formes et svar på forskningsspørgsmålet udtrykt gennem en proces model.

Indledningsvis præsenteres emne, problemstilling, spørgsmål samt centrale begreber.

Baggrunden for emnet, beskrives i Kapitel 2, "Lys, et multidimensionalt design element". Her diskuteres lys som multidimensionalt design element i et arkitektur historisk perspektiv samt i relation til afhandlingens publikationer, som rejser en diskussion om behovet for transdisciplinært samarbejde i udviklingen af fremtidens bæredygtige byggeri. Afsnittet konkluderer, at der med den aktuelle fokus på energioptimering af byggeriet er et stort potentiale i at udvikle viden om at bruge lyset som multidimensionalt design element.

Empirien findes i Kapitel 3, "Tre eksperimenter – videns baserede metoder og design processer". Her systematiseres observationer, processer og teorier fra tre eksperimenter gennemført i tidligere projekter. Observationerne sammenfattes for hvert eksperiment i en proces model.

Teorien udfoldes i Kapitel 4, "Innovation, design research og practice theory - mod en model for det arkitektoniske eksperiment". Her relateres observationerne fra empirien til teorier og modeller omhandlende innovation, design research og practice theory.

Modellen præsenteres i Kapitel 5, "Konklusion og perspektivering". Modellen er en metode, der sammenfatter observationer fra empirien og de teoretiske refleksioner. Den teoretiske proces model udgør et svar på afhandlingens spørgsmål.

Herefter findes en litteraturliste med referencer samt en illustrationsliste og en liste over egne publikationer, der indgår som en del af denne afhandling. Disse publikationer er listet [1], [2], [3]... Samme signatur er brugt som reference til disse artikler i afhandlingen.

Endelig findes samtlige 10 publikationer, der udgør en del af denne afhandling. Disse findes på deres originalsprog, hvorfor nogle vil være på engelsk og andre på dansk.

Hovedparten af den dokumentation, der refereres til som empirisk materiale findes i egne publikationer bagest i afhandlingen. For dokumentation, der ikke findes i afhandlingen eller er tilgængeligt via referencer til gængse søgesystemer, så som citater fra studerendes rapporter, findes i et dertil indrettet arkiv og kan rekvireres ved henvendelse til Lene Rasmussen, lr@create.aau.dk

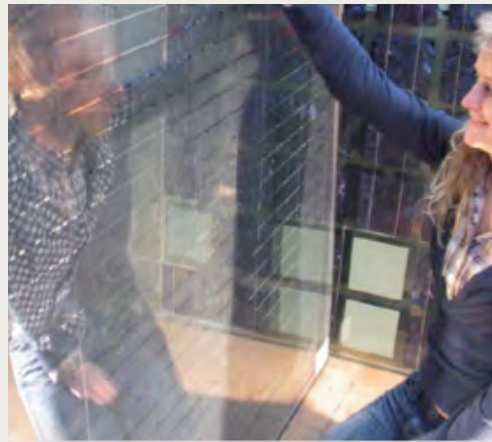
Citater fremstår i det sprog de findes i kilderne. Idet de fleste kilder er engelske vil hovedparten af citater være skrevet på engelsk. Udvalgte begreber benyttes ligeledes på engelsk, for en indikation af at et begreb er engelsk skrives ordet i kursiv.

God læselyst.

1.



2.



3.



Eksperiment 1,

kaldes "Fra solcelle-teknologi til energiproducerende vindue". Projektet er gennemført i et samarbejde mellem studerende og forskere fra arkitektskoler og højteknologiske udviklingsmiljøer. Her udvikles arkitektoniske værdiparametre for transparente solcellepaneler til integrering i udviklingen af en såkaldt PEC solcelle teknologi.

Eksperiment 2,

kaldes "Fra regulerende komponent til producerende rum". Projektet er gennemført i et samarbejde mellem arkitektskole, teknologisk udviklingsmiljø, vinduesindustrien, og statsligt byggeforsknings institut. Her udvikles værdisætning af transparente tyndfilm solcelle komponenter gennem arkitektoniske kompositioner, eksponering og kommunikering af panelernes værdier i.

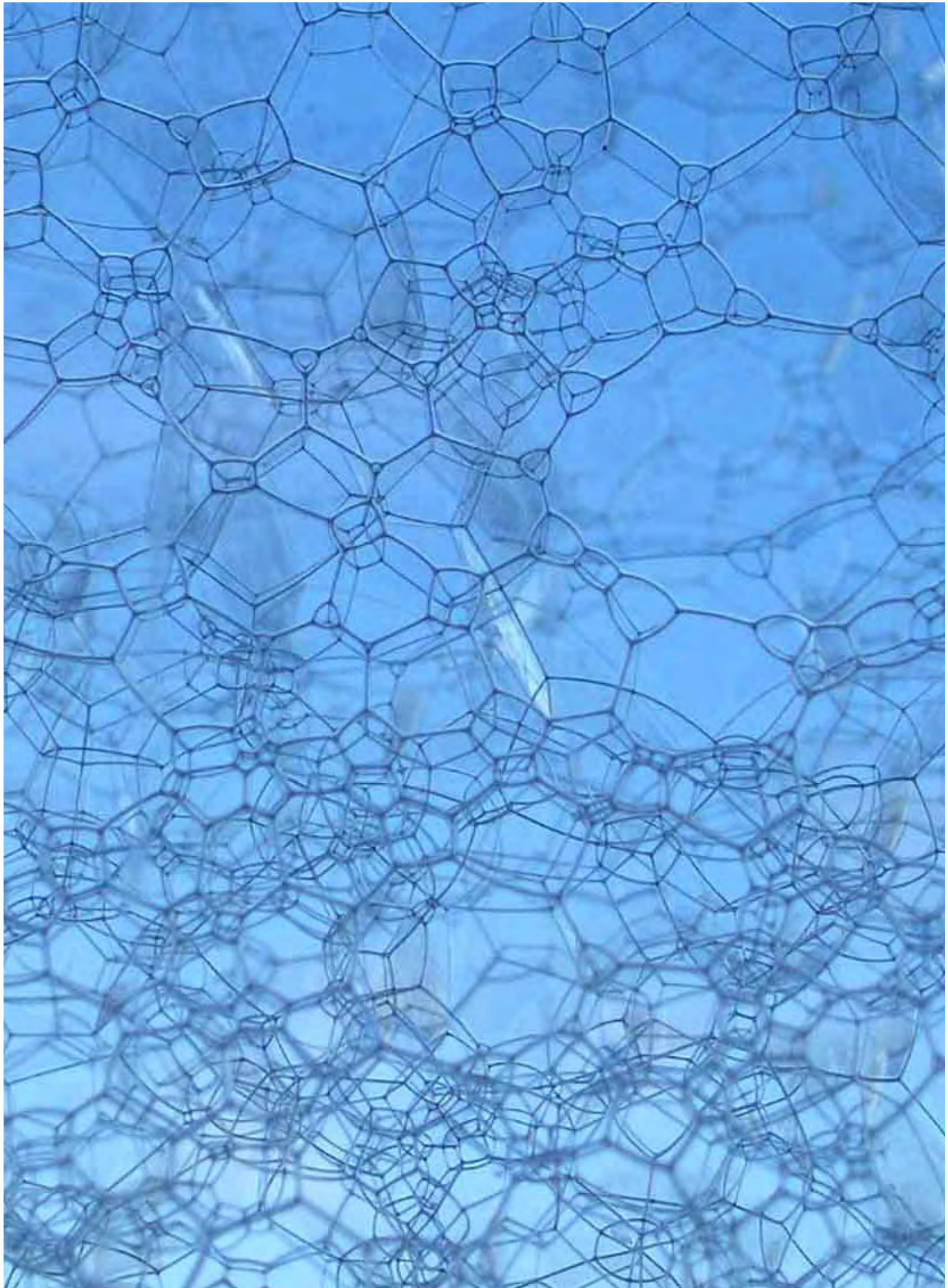
Eksperiment 3,

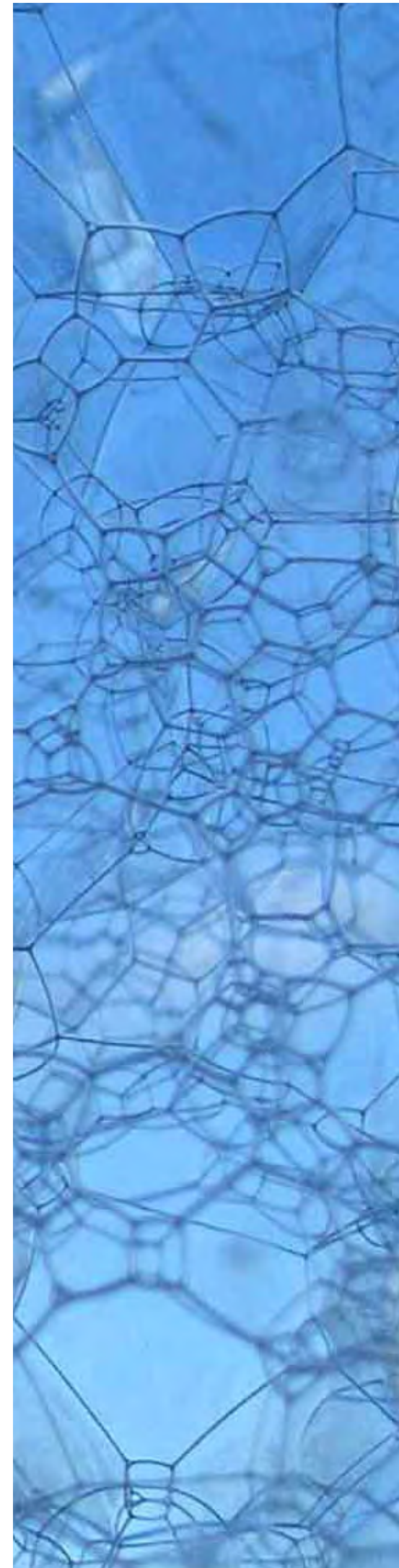
kaldes "Fra byggekomponent til bygning, der giver mere end den tager". Projektet er gennemført mellem producenter fra facade- og ovenlysvindues industrien, arkitekter og ingeniører m.fl. omkring udvikling, opførelse og test af en energiproducerende bolig, med masser af dagslys og frisk luft.

INDHOLD

RESUME/SUMMARY	4
FORORD	6
TAK	7
PUBLICEREDE ARTIKLER	8
LÆSEVEJLEDNING OG DISPOSITION	9
1. INTRODUKTION - hvad med at designe med lys - sammen?	15
Lys, energi og arkitektur - et bæredygtigt potentiale	16
Problemområdet	17
Metoder og spørgsmål	17
Det arkitektoniske eksperiment	19
2. LYS - et multidimensionalt design element	23
Design med lys	24
Design sammen	27
Lys i et historisk perspektiv	29
Lys i en bæredygtig udvikling	37
Lys og energi perspektiveret i egne publikationer	39
Resume - lys forbinder viden	41
3. TRE EKSPERIMENTER - videns baserede design processer	45
Ekspperiment 1. Fra solcelleteknologi til producerende solafskærmning	49
Proces og metoder	50
Begrebet transparens	56
Viden og kreativitet udviklet i processen	57
Resume og model	63
Ekspperiment 2. Fra regulerende component til producerende rum	65
Proces og metode	66
Matrix til sammenstilling af værdier	69
Viden og kreativitet udviklet i processen	71
Resume og model	74
Ekspperiment 3. Fra energikrav til bygning der giver mere end den tager	76
Proces og metoder	78
Viden og kreativitet udviklet i processen	83
Resume og model	87
Sammenstilling af de tre modeller	88

4. INNOVATION, DESIGN OG PRAKSIS -teori mod en generel proces model	95
Innovative processer – at linke viden på tværs af grænser	98
Knowledge boundaries – at transformere viden på tværs af grænser	98
Teori om knowledge boundaries reflekteret i EX Modellen	99
Knowledge brokering – at linke læring og innovation, Hargadon	102
Teori om knowledge brokering reflekteret i EX Modellen	103
Resume - at linke viden på tværs af grænser	105
Design research – at linke forskning og design	106
The lab, field, and showroom	108
The lab, field, and showroom reflekteret i EX Modellen	108
Entrance levet, forskningsspørgsmål og hypotese	111
Entrance levet, forskningsspørgsmål og hypotese relateret til EX Modellem	112
Resume – at linke forskning og design	112
Praksis – at linke humaniora og design	113
Practice theory	114
Practice theory i relation til det arkitektoniske eksperiment	116
Resume – at linke humaniora og design	119
Resume af teori om innovation, design og praksis	120
5. KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING - hvad med at designe med lys - sammen?	123
Model for arkitektoniske eksperimenter	126
Metode refleksion	127
Perspektivering	128
Det arkitektoniske eksperiment i praksis	128
Det arkitektoniske eksperiment i undervisning	129
Hvad med at designe med lys – sammen?	129
LITTEKATUR	131
ARKIV	137
PUBLICEREDE ARTIKLER	139





1.INTRODUKTION

- HVAD MED AT DESIGNE MED LYS - SAMMEN?

1. INTRODUKTION

- hvad med at designe med lys - sammen?

"Light has always been recognized as one of the most powerfull formgivers available to the designer, and great architects have always understood its importance as the principal medium which puts man in touch with his environment." Lam (1977, p.10)

LYS, ENERGI OG ARKITEKTUR – ET BÆREDYGTIGT POTENTIALE

I ovenstående citat af William Lam, beskrives hvordan lyset er et af de stærkeste design elementer. I disse år får lyset som design element en særlig opmærksomhed med fokus på at skabe forsyningssikkerhed og minimering af CO2 udslip. Energiforbrug til opførelse og drift af bygninger i Vesten udgør i dag 40% af det samlede energibehov. (Wall, 2008) Derfor er der i nationale og internationale energi mål og nye standarder og bygningsreglementer defineret ambitiøse kvantitative krav til opførelse, reovering og drift af vores byggede miljø.

Et grundlæggende potentiale for en bæredygtig udvikling er udnyttelsen af energien direkte fra solen. Solen leverer 10.000 gange mere energi til jorden end vores samlede behov. (Lovgren, 2005) Udfordringen ligger i at udvikle teknologier, komponenter og bygninger, der høster solens energi gennem aktive og passive tiltag. Lys bliver derved et centralt kvalitativt energiteknisk design element. Disse kvantitative parametre skal kunne sammenstilles med kvantitativt værdier, så lys bliver et multidimensionalt design element, der kan sættes i spil i design processen og skabe værdi indenfor såvel tekniske, funktionelle som kunstneriske kriterier.

For en optimal udnyttelse af lysets potentialer, skal viden om lysets tekniske og oplevede værdier kunne kommunikeres og udvikles sammen, på tværs af fag i design processen.

Ovenstående er det fælles tema i en række tværfaglige eksperimenter, jeg har gennemført i perioden 2001-2011 som forsker og underviser på arkitektskoler og som projektleder i byggeindustrien. I disse eksperimenter er der udviklet metoder til at samarbejde på tværs af forskning, uddannelse, industri og tekniske udviklingsmiljøer i processen mod at udvikle energiproducerende teknologier, komponenter og bygninger med nye arkitektoniske potentialer.

Afhandlingen er motiveret af min erfaring fra disse tværfaglige eksperimenter, hvor der med baggrund i kunstneriske udviklingsmiljøer er oplevet processer og værdier skabt ved at udfolde lysets potentialer gennem forskellige fagligheder og tilgange. Det er på baggrund af denne erfaring og motivation, at der i denne afhandling skabes en teoretisk perspektivering, hvor det diskuteres, hvordan det arkitektoniske eksperiment kan integrere viden på tværs af fag og motivere en kreativ design proces og samtidig skabe ny viden.

PROBLEMOMRÅDET

"The importance of knowledge in design + the importance of mixing knowledge cross boundaries cannot be stressed enough" (Carlile, 2002)

At designe er en proces med mange dimensioner, hvor viden fra svært forenelige verdener med tekniske, teoretiske og oplevede værdier skal syntetiseres i den skabende proces mod et produkt eller en bygning, der både opfylder nuværende og fremtidige generationers behov, ideelt set uden at belaste miljøet. Udvikling af teknologi bygger oftest på kvantitative værdier og metoder, der udvikles gennem lineære og evidens baserede processer. Hvorimod design af rum og atmosfære primært er en skabende proces, der er kvalitativ og oplevet og derved ofte styret af subjektive erfaringer, intuition og åbne iterative processer. Disse kulturer og processer er svært forenelige og meget udvikling af teknologi, viden og design foregår derfor i isolerede fagmiljøer. Dette rejser nogle grundlæggende spørgsmål. Hvorfor er det så svært at arbejde på tværs af faglige grænser? Og hvorfor er det særligt svært at kombinere design med videnskab?

Problemstillingerne omkring at skabe en bæredygtig udvikling er så kompleks, at der forudsættes flere fagligheder for, at skabe løsninger. Der opstår nye samarbejdsrelationer på tværs af fag og kulturer. Nye transdisciplinære uddannelser tilskyndes og kunstneriske uddannelser skal forskningsrelateres og videnskabelige uddannelser relateres til design og innovation. Dette skaber et behov for, at præcisere, hvordan de faglige discipliner kan tilføre deres viden i transdisciplinære processer og sammen skabe værdi for en fælles bæredygtig udvikling.

Afhandlingens arbejdshypotese er, at der er et behov for at optimere en bæredygtig udvikling ved at designe med viden om lys fra forskellige fagområder og derved motivere en kreativ design proces og generere ny forsknings baseret viden. Denne proces kan omsættes i en konkret proces model.

METODER OG SPØRGSMÅL

På baggrund af arbejdshypotesen stilles hovedspørgsmålet:

Hvordan kan lys som multidimensionalt design element motivere en kreativ design proces og generere ny viden, der understøtter en bæredygtig udvikling?

For at skabe en forståelse for emnet om at designe med viden om lys indhentes baggrundsviden til besvarelse af spørgsmålet: *Hvordan har lys været brugt som multidimensionalt design element i arkitekturen?*

Forskningsområdet perspektiveres gennem indsamling og sammenstilling af referencer fra arkitekturhistorien, videnskabs- og arkitekturteoretikere samt egne publikationer. Afhandlingens tema "lys som multidimensionalt design element" beskrives i disse kontekster og aktualiseres i et bæredygtighedsperspektiv.

Dernæst gennemføres en systematisk observation af de processer, metoder og resultater, der er udviklet og anvendt i de tre typer eksperimenter, der udgør empirien i afhandlingen. Disse eksperimenter er udført som udviklings- og undervisningsprojekter. De tre eksperimenter repræsenterer tre skalaer; teknologi, komponent og bygning. Fælles for eksperimenterne er, at de er skabt gennem samarbejde og vidensdeling på tværs af kunstneriske og tekniske miljøer. En anden lighed er, at der i hver proces er defineret tre forskellige kriterier, repræsenterende forskellige videns områder og funktioner. Spørgsmålene for de empiriske undersøgelser er: *Hvordan kan viden om lys fra forskellige discipliner motivere en kreativ design proces? Hvilken ny viden genereres i de tre eksperimenter?*

For at afsøge det empiriske materiale for hvordan viden om lys har motiveret til en kreativ proces og skabt ny viden, systematiseres observationer af de tre eksperimenter ved at definere fire principper i processen; *1.vision, 2.criteria, 3.construction og 4.evaluation*. I alle tre eksperimenter er der i processen defineret *tre criteria*, der repræsenterer viden om lys fra forskellige fagområder. I observationerne undersøges det, hvorledes viden indenfor de tre criteria udvikles, systematiseres og syntetiseres i proces gennem *vision, construction og evaluation*. Tre teoretiske proces modeller udvikles til at illustrere processerne i de tre eksperimenter og deres forhold mellem principperne criteria, vision, construction og evaluation.

Efter de systematiske observationer af empirien antages det, at der er potentialer i at motivere en kreativ proces ved at inddrage viden fra andre fagområder i processen. Antagelsen om værdien i de fire principper (*criteria, vision, construction og evaluation*) fra empirien underbygges i en teoretisk del gennem teorier indenfor innovation ved at afsøge spørgsmålet: *Hvordan kan teori om innovative processer bidrage til at viden kombineres og transformeres gennem modellen for det arkitektoniske eksperiment?*

Teorier om innovative processer belyser, hvordan viden på tværs af faggrænser, funktioner og kulturer, inddrages, oversættes, kombineres og transformeres i processen. Denne videnskabelige begrebsliggørelse af processen integreres i den teoretiske proces model.

Observationerne af empirien viser også, at den viden der produceres i design processen i de tre eksperimenter er svær at evaluere og derved svær at kommunikere som forsknings baseret viden. Derfor afsøges spørgsmålet: *Hvordan kan teori og metoder fra design bidrage til at modellen for det arkitektoniske eksperiment skaber både forsknings- og design baseret viden?*

Specifikt afsøges det, hvordan teorier om design research kan underbygge, at viden fra forskellige fag kan evalueres parallelt ved inddragelse af evalueringsparametre indenfor forskellige forskningstraditioner i den teoretiske proces model.

Endelig fremhæver observationerne af empirien, at der er potentialer i at tage en bruger orienteret tilgang indenfor evalueringskriterier, således at designet evalueres med afsæt i brugerens praksis og ikke produktet. For at afsøge og diskutere dette inddrages teori om bruger og praksis gennem spørgsmålet: *Hvordan kan metoder fra humaniora skabe fokus på bruger praksis i modellen for det arkitektoniske eksperiment?*

Med denne teoretiske underbygning justeres modellen mod en teori illustreret gennem en proces model for arkitektoniske eksperimenter. En model, der kan kommunikere om tværfaglige kreative og forsknings baserede processer. Modellen skal fungere som en explicit, generel "codifiable" proces model, der udgør et svar på afhandlingens forskningsspørgsmål.

Det er ikke hensigten at pege på nye metoder eller regler, men at modellen for arkitektoniske eksperimenter vil illustrere principper, en tilgang og tænkning, der både kan systematisere og skabe et rum for kreativitet.

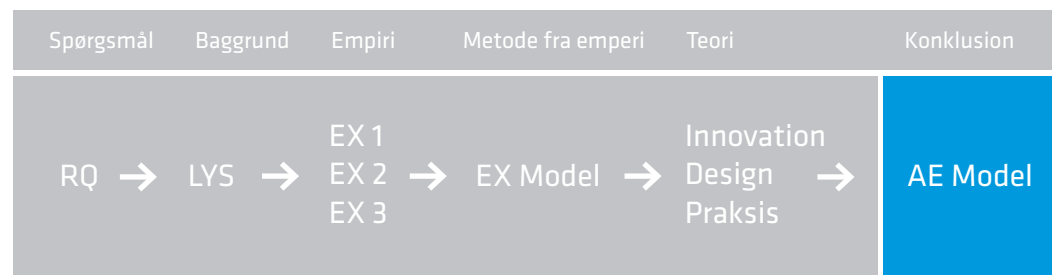


Fig. 1.1: Processen fra forskningsspørgsmålet over lys som design-element til empirien, som er en undersøgelse af processerne i de tre eksperimenter, hvilket resulterer i en proces model, EX Modellen. Denne model reflekteres i teorier indenfor innovation, design og praksis. Afhandlingen konkluderes i en proces model for det arkitektoniske eksperiment, AE Modellen.

DET ARKITEKTONISKE EKSPERIMENT – EN METODE

"In the most generic sense, to experiment is to act in order to see what the action leads to. The most fundamental experimental question is, "What if?"" (Schön, 1991, p. 145)

I afhandlingen diskuteres det, hvordan design processen kan organiseres, så der opstår mulighed for at inddrage såvel kreative som forsknings baserede metoder i den skabende proces. Denne metode beskrives i afhandlingen gennem "Det arkitektoniske eksperiment".

Eksperimentet defineres som: "A scientific procedure undertaken to make a discovery, test a hypothesis or demonstrate a known fact" og "experimentation" defineres som: "A course of action tentatively adopted without being sure of the outcome" (<http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/experiment>, 01.09.13)

Eksperimentet kan altså med en traditionel videnskabelig tilgang defineres ud fra en formodning eller et spørgsmål, uden at kende udfaldet. Derved er det muligt, at formulere formodninger, der er visionære og uforudsigelige og i processen at fokusere på, at kunne demonstrere de erkendelser og opdagelser, der sker i processen. Den videnskabelige tilgang med at definere og teste hypoteser kan, når der relateres til praksis, sammenstilles med andre former for eksperimenter.

Thomas Binder (2012) refererer til Donald Schön, og hans bøger om "the reflective practitioner", om at uddanne reflekterende praktikere (Schön 1983, 1987). Schön beskriver, hvordan designere lærer og udfører kreativitet gennem professionelle processer, der indeholder, hvad han kalder, "*reflection-in-action*", altså en fokus på at der i kreativiteten skal kunne reflekteres i processen. Schön siger, at "*knowing and doing are inseparable*". Han beskriver, hvordan det at vide og det at gøre er uadskillelige, og skildrer, hvordan der skal udføres "*on-the-spot eksperimenter*", hvor materialerne (modeller, skitser, tegninger) bearbejdes i hånden og "taler tilbage" på ofte overraskende måder, og hvor definerings og indkredsning af de specifikke problemstillinger eller forundrende design situation, er vigtige aktiviteter. Af særlig relevans er hans studier af det arkitektoniske atelier som en pædagogisk model for denne form for "*reflection-in-action*". Observation af et sådant reflekterende arbejde er kendetegnet ved "*learning-by-doing*", coaching snarere end undervisning, og en dialog baseret på gensidig refleksion over handling mellem lærer og elev" (2012)

Til diskussion af hvor eksperimentet placerer sig i spændet mellem videnskab og kunst benyttes i denne afhandling Schöns tre definitioner af eksperimenter, beskrevet af Hansen, Kolmos og Kofoed (2003) og i Schön (1991):

The explorative experiment, "*Exploratory experiment is the probing, playful activity by which we get a feel of things*" (Schön, 1991. P. 145). Eksperimentet er en succes når det leder til en opdagelse, en oplevelse af noget. Det udføres uden definerede forventninger eller formodninger baseret på fornuft og intuition. Viden fra denne type eksperimenter er ofte tavs (tacit). Der findes ikke en beskrivelse af processen og udfaldet er ret tilfældigt. Denne type eksperimenter findes hos barnet der forsøger sig frem, i praksis og også ifølge Schön (1991) hos videnskabsmanden, når han i den tidlige fase udfordrer et bestemt stof for at se hvordan det vil reagere.

The move-testing experiment. "Any deliberate action undertaken with an end in mind is, in this sense, an experiment...the move is affirmed when it produces what is intended for it and is negated when it does not." (Schön, 1991, p. 146). Eksperimenter der indbefatter, at der er en formuleret intention med eksperimentet og at der foretages en form for refleksioner, der slutter eksperimentet.

Endelig er the *Hypothesis testing experiment*. Dette eksperiment er en succes når det har effekt på de definerede hypoteser. Eksperimentet er relateret til videnskabelige eksperimenter, med formulerede mål og hypoteser, der kan eftervises, med forskellige variabler. Her er målet, at skabe en overførsel af viden gennem generalisering og konceptualisering via analyserne, for derved at skabe eksplicit viden.

Schöns definition af de tre typer eksperimenter er god til at beskrive spændet mellem den observerende og den hypotese testende tilgang. Definitionerne benyttes til beskrivelsen af de tre eksperimenter, der udgør empirien i denne afhandling og til at diskutere hvordan eksperimentet i praksis og i videnskaben kan kombineres.

Schön skriver at *on the spot experimenting* er karakteriseret af "*reflection-in-action*"; så er det logiske hypothesis testing experiment principielt det samme som i en forsknings kontekst. Det er netop, hvad der undersøges i denne afhandling. Hvordan kan denne *reflection-in-action* kombineres med hypotesen i eksperimentet?

Det arkitektoniske eksperiment skal derfor forstås som en syntese mellem et traditionelt videnskabeligt objektivt kontrolleret eksperiment, hvor videnskabelige metoder, som test af hypoteser bliver styrende for valg i design processen og Schöns "*on-the-spot eksperimenter*", hvor der arbejdes med "*reflection-in-action*" og "*learning-by-doing*". Balancen er, at det arkitektoniske eksperiment skal fastholde en kreativ proces og samtidig skabe ny viden. En viden, der er generel, da denne kan forklares gennem generelle hypoteser, der via *reflection in action* af- eller bekræftes.

I definitionen af det arkitektoniske eksperiment afsøges derfor processer, hvor der benyttes intuitive, eksplorative, metoder med reference til skabelsen af arkitektur, ligesom der i processen undersøges, syntetiseres og udforskes med afsæt i intentioner og gennem det at bygge og konstruere modeller, mock-ups etc. Samtidig vil der i det arkitektoniske eksperiment være metoder med reference til videnskabelige eksperimenter for at teste og evaluere.

Endelig vil der i diskussionen af eksperimentet være en forskel på eksperimenter benyttet i praksis og indenfor forskning. Schön beskriver forskellen mellem praksis og forskning som forholdet mellem at ændre ting og at forstå dem. Hvor praktikerens vil transformere situationen til noget bedre, og den forståelse han vil skabe i processen skal være for at skabe denne transformation. Så vil forskeren skabe en forståelse for hvorfor tingene hænger sammen som de gør. Derved er der ifølge Schön (1991) en forskel på praktikerens hypotese testende eksperiment og det kontrollerede eksperiment som foretages af forskeren. Praktikerens lader hypotesen blive virkelig gennem eksperimentet, gennem designet, hvorimod forskeren behandler sine hypoteser med en distance og objektivitet.

I afhandlingen diskuteres det, hvorledes Schöns tre eksperimenter placerer sig i processen for *det arkitektoniske eksperiment* og hvorledes de motiverer såvel videns produktion som den kreative proces.





2. LYS

- ET MULTIDIMENSIONALT DESIGN ELEMENT

2. LYS – ET MULTIDIMENSIONALT DESIGN ELEMENT

“While light is by definition energy, its effects transgress the realm of the scientific, moving into that of the experimental. Light renders our world in an endless array of visual permutations, revealing colors, textures, distances, or the passing of time”. (Descottes, 2011, p.8)

I dette kapitel skabes en baggrundsviden om afhandlingens emne, at optimere en bæredygtig udvikling ved at designe med viden om lys fra forskellige fagområder. I første del dannes perspektiver for, hvordan arkitekter og lysdesignere har defineret kriterier og værktøjer til at beskrive lysets mange dimensioner. Det beskrives, hvordan der kan arbejdes på tværs af fag, teori og praksis i transdisciplinære teams og hvordan denne tilgang relateres til teori-afsnittet i afhandlingen. Herefter beskrives det, hvordan lys benyttes som kvantitativt og kvalitativt design element på tværs af fag i et arkitektur historisk perspektiv. Endeligt diskuteres potentialet i at arbejde transdisciplinært med lys som design element i udviklingen af fremtidens bæredygtige byggeri, ved bl.a. at referere til udviklingen af danske energibestemmelser samt gennem egne publikationer om arkitektoniske potentialer i energiproducerende arkitektur.

Afhandlingens hovedspørgsmål om, hvordan lys som multidimensionalt design element kan motivere en kreativ design proces og generere ny viden, der understøtter en bæredygtig udvikling, perspektiveres i dette kapitel med fokus på lys og design på tværs af fag ved at diskutere:

Hvordan har lys været brugt som multidimensionalt design element i arkitekturen?

Kapitlet konkluderer, at lys siden antikken har været brugt som et design element, der tager afsæt i både kvalitative og kvantitative tilgange såvel som teoretiske og praktiske metoder på tværs af fag. Med det aktuelle behov for energioptimering af byggeriet er der et særligt potentiale i at udvikle modeller for, hvordan lyset udfoldes som multidimensionalt design element, hvor såvel kvalitative som kvantitative værdier kan defineres og udvikles i transdisciplinære design processer.

DESIGN MED LYS

“Light is creating space it is 3 dimensional, not only creating a picture – we connect daylight with heat, smell and unpredictability in the nuances and, light illuminates space in terms of interactions and interrelations with the universe and the body in the space”. Pallasmaa (2011)

Lysets indvirkning på mennesker og miljø er så stor og kompleks, at det ikke er muligt at definere denne med ord, tal eller billeder. Arkitekter og lysdesignere har løbende defineret teorier og metoder til at kommunikere, strukturere og indfange lyset, hvilket vil blive beskrevet i dette afsnit gennem udvalgte eksempler.

Begrebet "multidimensionalt" benyttes i afhandlingen til at beskrive noget, der kan angribes indenfor mange dimensioner som fagligheder, funktioner og miljøer. Som når Pallasmaa i citatet ovenfor skriver om, hvordan lyset kan skabe rum for oplevelse, ikke kun med synssansen, men også med lugte og følesansen, hvilket blot er få dimensioner af lysets spektrum af virkemidler.

Dimension er et velkendt begreb fra arkitekturen, hvor det 2-dimensionelle er en flade og det 3-dimensionelle er helt essentielt for at skabe og forstå rum. Ligeledes tales der om det 4-dimensionelle, hvor tiden inddrages. Med multidimensionalt menes det modsatte af en-dimensionel, som er et enkelt aspekt, et punkt, en ensidig tilgang. Ved udtrykket "dagslys som multidimensionalt design element" fremhæves lysets mange dimensioner spændende fra det målbare over det oplevede til det funktionelle. Her i afhandlingen bruges lys som multidimensionalt design element til at demonstrere, hvordan bæredygtig arkitektur kan udvikles i et tværfagligt regi, hvor flere faglige miljøer kan overføre deres viden om lyset, med mange forskellige dimensioner.

Dagslysets mange dimensioner skal forstås som: lys som energikilde, hvor lys via energiteknologier integreret i bygningen omdannes til en brugbar energiform, lys som passiv varmekilde, lys som kilde til belysning af genstande og oplevelse af rum og materialer, lys som helende element med fokus på døgnets og årets rytmer og lysets påvirkning af sind og fysik, lys som æstetisk virkemiddel, lys som tid, lys som kulturbærer etc. [1],[2],[6],[10]

Der er udviklet mange definitioner af lys og af hvordan man kan kvalificere design processen ved at definere design kriterier, hvor lyset indgår. Nedenfor gennemgås eksempler på såvel design kriterier som begreber til at beskrive lyset samt behovet for samarbejde på tværs af fag.

William M.C.Lam har skrevet klassikeren "Perception and lighting as formgivers for architecture" i 1977. Her beskriver Lam lyset, ikke i tekniske termer, men med en bruger orienteret tilgang, hvor han definerer positive værdikriterier, som han kalder "biological needs for visual information:"

"Orientation, Physical security, Relaxation of the body and the mind, Adjustment of the biological clock (Time orientation), Contact with nature, sunlight, and with other living beings and definition of personal territory" (Lam, 1977, p. 20)

Lam (1977) skriver om behovet for at definere og tilføje positive værdikriterier, så som at skabe positiv fokus på orientering, guidning samt at fremhæve biologiske behov. Nye design-processer og redskaber, mere kommunikation mellem design teamets medlemmer vedrørende positive målsætninger samt enkle og flere visuelle redskaber vil ifølge Lam skabe større effekt af lyset. Lam's tilgang underbygger tilgangen i denne afhandling, hvor den overordnede design proces, målsætninger og arbejdet med lys gennem hele processen er i fokus ved at definere værdikriterier, der skaber positiv værdi for brugeren. I denne afhandling er bæredygtighedsperspektivet tilføjet i form af fokus på lys som energi.

Et eksempel på en dimension af dagslysets betydning er lysets helbredende effekt. Dagslys i bygninger har indflydelse på vores fysiske som psykiske tilstand, hvilket, har været genstand for design principper i modernismen. I de seneste år er dette yderligere videnskabeligt dokumenteret. I *"Daylighting, Architecture and Health, Building Design"* af Mohamed Boubeskri (2008) inddrages viden fra forskning indenfor lægevidenskab i arkitektoniske overvejelser omkring lys i vores byggede miljø. Overordnet er der to måder lyset påvirker kroppen. Lysets indvirkning gennem vores syn og lysets påvirkning ved bestråling af vores hud, hvorved der produceres D vitamin. Dette giver mulighed for at definere designkriterier, hvor lyset defineres i relation til dets styrke, farve og retning i forhold til, hvordan det påvirker kroppen og sindet.

En oversættelse af denne lægevidenskabelige viden til design kriterier knyttet til brugeren findes i *"Helende Arkitektur"* af den danske arkitekt og forsker Kathrine Frandsen m.fl. (2011) Her demonstreres et værktøj, der skal være med til at kvalificere de arkitektoniske beslutninger, der foretages omkring rumlig udformning af fremtidens hospital byggeri. Frandsen m.fl. definerer 10 faktorer eller virkemidler, hvoraf lys er den ene. De beskriver lysets betydning i forhold til faktorerne: tilfredshed, orientering, døgnrytme og søvn, depression, indlæggelsestid og dødelighed, smerte og stress og endelig fejl. Deres vidensindsamling peger på lys som en vigtig og veldokumenteret helende faktor i udformningen af fysiske rammer på hospitaler.

"Architectural Lighting Design with Light and Space" Descottes (2011) beskriver Descottes nødvendigheden i, at lys designeren arbejder transdisciplinært på tværs af faggrænser:

"Moreover, an architectural lighting designer's work is not limited to the realm of aesthetics, but also responds to functional, technical, spatial, and experiential necessities of a project. Lighting design necessitates a deep, meditative exchange of knowledge, and therefore it must be understood not as an interdisciplinary field but as a transdisciplinary one that traverses the boundaries of conventional thought. (Descottes, 2011, p.9)

På baggrund af Descottes erfaringer og refleksioner fra praksis og for at underbygge det eksperimenterende og visuelle potentiale der ligger i at designe med lys udfoldes de seks visuelle principper for lys defineret som design principper, der kan fungere som både kvantitative elementer, og som visuelle, kvalitative og oplevede elementer:

"The six principles – illuminance, luminance, colour and temperature, height, density, and direction and distribution – are empirical by nature, but their quantifiable measures embody only a portion of their working potential. More important each principle address a set of visual factors that are not easily measured." (Descottes, 2011, p.13)

På Kunstakademiets Arkitektskolen i København er der til undervisningen i arkitektonisk belysning udarbejdet materiale, med reference til den svenske professor og arkitekt Anders Liljefors. Her beskrives hvorledes visuelle iagttagelser kan knyttes til forskellige fysiske faktorer. (Mathiasen, 2006, pp.6-8) Til visuel vurdering opstilles 5 visuelle begreber: rum,

form, overflade, farve og lys. Til beskrivelse af lysets visuelle egenskaber opstilles 7 grundbegreber, der karakteriserer iagttagelser og er definerbare dele af synsoplevelsens helhed: lysniveau, lysheder, skygger, reflekser, blænding, lysfarve, farve. Til beskrivelse af lysets fysiske egenskaber benyttes fire faktorer: spektrale egenskaber(farve), intensitet (styrke), rumvinkel (størrelse) og retning. Med begreberne kan der beskrives, hvad det er vi ser og derefter hvad det er vi måler.

Der er udviklet manualer, der beskriver "værktøjer" for, hvordan man kan bruge lysets mange potentialer for at kvalificere beslutningsprocessen. I 2012 udgiver således Henning Larsen Architects m. fl. publikationen "*Hvad med lys? - designmanual med forslag til helhedsrenovering.*" (Kongebroer, 2012). Her isolerer de dagslyset som parameter i forsøget på at gøre viden om dagslys anvendelig. De samler forskellige virkemidler og belyser, hvordan de i fire skalaer (byen, karréen, bygningen og boligen) skaber værdi i et større bæredygtighedsregnskab ved at definere udfordringer, mål og eksempler på virkemidler indenfor de fire skala. Derved skaber de fokus på dagslysets potentialer i forhold til både arkitektur, trivsel, sundhed, energi og økonomi, hvilket især kan skabe en effekt for samarbejde mellem forskellige aktører indenfor renovering af bygninger.

Ovenstående eksempler demonstrerer, hvordan lys kan defineres med mange dimensioner alt efter hvor fokus lægges og hvilken tilgang der tages til lyset. Der er i ovenstående en primær fokus på at definere kvalitative værdier, som sundhed og velvære gennem det oplevede lys, samt hvordan disse kan sammenstilles med det målte lys.

Ingen af ovenstående metoder arbejder med, hvordan de forskellige definitioner af lys kan syntetiseres i design processen, ved at arbejde med lyset som multidimensionalt design element. I denne afhandling arbejdes der mod en udvikling af en proces model, der illustrerer, hvordan forskellige kriterier indenfor lys kan udvikles og syntetiseres i en videns baseret og transdisciplinær design proces. I denne model kan ovenstående definitioner indarbejdes, for en nuancering af, hvordan lyset på en gang kan beskrives i fysiske termer og oplevede kvaliteter.

DESIGN SAMMEN

Samarbejdsformen har stor betydning for at integrere viden om lys på tværs af fag i design processen. I afhandlingen benyttes de definitioner for tværfaglighed, der af Meeth(1978) er defineret som forudsætningen for samarbejde på tværs af fagligheder. Meeth definerer en hierarkisk klassificering af fem begreber indenfor samarbejdsformer. Nederst findes *intradisciplinary* studier, som består af studier indenfor en enkelt disciplin. Herefter kommer *cross-disciplinary* studier, hvor en faglighed er betragtet fra en anden faglighed. Det næste trin er *multidisciplinary* studies, hvor der foregår en sammenstilling af discipliner, hvor hver disciplin bidrager med deres synspunkt, men uden hensigt om integration. Det næsthøjeste trin er *interdisciplinary* studies, som integrerer forskellige discipliner til løsning af et specielt problem. Endelig er ifølge Meeth det højeste trin integrerede studier, *transdisciplinary*. Disse går ud over disciplinerne, idet de tager udgangspunkt i et problem og bruger en problemløsende tilgang, hvor viden fra forskellige discipliner bidrager til at finde en løsning. (Busk, 2013)

Meets' betegnelser benyttes senere i dette kapitel til at beskrive samarbejdsformer indenfor forskellige perioder i arkitekturhistorien samt i Kapitel 3 til beskrivelse af samarbejdsformen i hvert af de tre eksperimenter. I det *arkitektoniske eksperiment* tages der afsæt i at udvikle viden gennem integrerede samarbejder som Meets beskriver som transdisciplinære, hvilket underbygges af Gibbons teorier om vidensproduktion.

Betegnelsen videns baseret design og design baseret viden bruges i afhandlingen for beskrivelse af, at der tilføres viden fra flere fagområder, der oversættes og transformeres i design processen til design og ny viden. Denne form for videns skabelse refererer til Gibbons (1994) definition af Mode 2, hvor han uddyber beskrivelsen af de transdisciplinære teams.

I "*The New Production of Knowledge - the dynamics of science and research in contemporary societies*" (Gibbons, 1994) - argumenterer Gibbons og hans kolleger for, at der findes den ny form for videns skabelse, Mode 2, der er kontekst orienteret og problemfokuseret og ikke mindst tværfaglig. De taler om, at den involverer transdisciplinære hold af forskere, der i en afgrænset tidsperiode arbejder sammen om løsnings specifikke problemer, som relateres til problemstillinger, der udspringer fra praksis. Derved foregår Mode 2 forskning meget ofte i samarbejde med en virksomhed og en uddannelses- og/eller videns institution. Det transdisciplinære betyder at der samarbejdes med andre videns institutioner og virksomheder, og at processen ikke er styret af én disciplin eller et fagområde. Derved skabes fokus på at tænke på tværs af fagdiscipliner og at samarbejde frem for at opnå homogenitet gennem en ensidig faglig fokus.

Denne type transdisciplinære teams er kendt indenfor design, hvilket Koskinen (2011, p. 30) refererer til i nedenstående citat:

"In research today, coalitions are a norm, not an exception. These coalitions tend to be strategic and temporary, usually lasting for only one project, and then disappear as parties move to other projects. To flourish in this environment, constructive design researchers need methodological and theoretical flexibility.

Teorien bag Mode 2 relateres i denne afhandling til den proces, der sker i de arkitektoniske eksperimenter. Det afsøges i næste kapitel, hvorledes disse processer består af kombinationen af praktiske problemstillinger, viden fra mange områder og metoder til at designe og konstruere i processen mod at skabe produkter og ny viden. Det afsøges ligeledes, hvorledes aktørerne i det arkitektoniske eksperiment skaber et fælles rum for kommunikation og kreativitet, hvor deres viden kan komme i spil og syntetiseres gennem vidensbaseret design og designbaseret viden, *knowledge based design og design based knowledge*.

"Hybridization reflects the need of different communities to speak more than one language in order to communicate at the boundaries and in the space between systems and subsystems" (Gibbons, 1994, p. 37).

Her rammer Gibbons ind i kernen af undersøgelsesområdet fra de tre eksperimenter, som uddybes i Kapitel 3. De forskellige fagligheder taler "more than one language" og det er ikke et spørgsmål om at tale et sprog men at finde grænseområderne, hvor der skabes rum for at kommunikere. I de tre eksperimenter har det netop været hensigten at skabe et fælles sprog gennem de tre kriterier, der defineres i hvert eksperiment og som oversættes i processen til en fælles syntaks ofte gennem modeller.

Det samme gør Hargadon (2002) i hans teorier om Knowledge Brokering, hvor han taler om at innovation skabes ved at rekombinere eksisterende viden på en ny måde, ved at linke, genkende og dele viden. Carlile (2002, 2003) taler også om betydningen af at skabe viden på tværs af grænser (knowledge boundaries) og om hvordan viden skal transporteres og oversættes, gennem en fælles syntaks og transformeres for at skabe innovation. Begge teorier understreger betydningen af at føre denne viden tilbage til de netværk og miljøer, som viden er tilført fra. I afsnittet om innovative processer i kapitel 4 diskuteres de to teorier fra Hargadon og Carlile og sættes i relation til det arkitektoniske eksperiment.

En af de nyere metoder til videns produktion er design research, som bl.a. er beskrevet i "*Design Research Through Practice. From the Lab, Field, and Showroom*" fra 2011 af Koskinen m.fl. De beskriver hvordan design kan skabe ny viden og hvordan man i processen kan arbejde med metoder fra tre traditioner, der er forankret i hhv. de naturvidenskabelige, de humanistiske og de kunstneriske fag – hvilket betegnes med de tre begreber "*the lab, the field, and the showroom*". Koskinen m. fl. refererer til design inden for digitale produkter. I Kapitel 4 relateres Koskinens teorier til processen i det arkitektoniske eksperiment.

I forhold til at bruge lys som design redskab kan de tre traditioner indenfor lys beskrives som måling af lys i lys-laboratoriet, undersøgelse af lys i en given kontekst med himmel og sol, herunder hvordan brugere agerer og oplever lyset og endelig the showroom, hvor lyset illustreres gennem mock-ups og andre installationer, hvor der skabes effekter ved lysets møde med rum og materialer. Hvilket også lægger op til, at der arbejdes på tværs af fag i transdisciplinære teams.

I det arkitektoniske eksperiment vil processen blive defineret på baggrund af, at viden om lys udveksles og syntetiseres i transdisciplinære teams, på baggrund af definitionen i dette afsnit.

LYS I ET HISTORISK PERSPEKTIV

I nedenstående eksemplificeres forskellige stilperioders tilgang til tværfaglighed ved at diskutere lyset som design element i arkitekturen.

Allerede i det første århundrede f.Kr. giver den romerske arkitekt og ingeniør Marcus Vitruvius (Morgan, 1960) anbefalinger til, hvordan man skaber arkitektur, herunder om nødvendigheden i at kunne sammenstille viden på tværs af fag, fra praksis og teori samt helt grundlæggende principper for, hvordan man arbejder med lyset i udformningen af rum.

I *"The ten Books on Architecture"* indleder Vitruvius (Morgan, 1960) med en beskrivelse af betydningen af at arbejde med praksis og teori, at viden er produktet af praksis og teori og at praksis kommer af øvelse og at teorien er evnen til at demonstrere. Vitruvius beskriver også, hvordan arkitekten skal kende til mange fagligheder og færdigheder for at forstå hvad ting betyder og hvad det er som giver dem betydning. Dette underbygges ved konkret at bruge referencer til musik, astrologi, geometri, sundhed etc. fra de græske filosoffer, til at beskrive konkrete eksempler og anbefalinger til, hvordan man bygger i praksis. F.eks. beskriver Vitruvius i kapitlet om *"The Zodiac and the Planets"* om lyset som multidimensionelt element, der både beregnes for at bestemme solens orientering og observeres, ved at følge skyggerne frem til vintersolhverv. Vitruvius beskriver, at det netop er gennem denne type af arkitektoniske principper og brug af kompasset som instrument, at de har fundet frem til hvordan solen opererer i universet (Morgan, 1960)

Vitruvius beskriver, at der i arkitekturen skal findes samhørighed mellem de tre parametre: *firmitas* (holdbarhed), *utilitas* (nyttighed) og *venustas* (skønhed). En triologi, der i denne afhandling refereres til i Kapitel 3 "Tre eksperimenter", idet der i hvert af disse eksperimenter er defineret tre kriterier, der tilsammen skal skabe en helhedsorienteret tilgang.

Vitruvius beskriver grundlæggende principper for hvordan rummene orienteres for optimal solorientering. Herunder betydningen i at bruge det østlige lys i soveværelser og biblioteker og det vestlige lys om vinteren til badeværelser og vinter lejligheder og endelig det nordlige lys til gallerier og andre steder, hvor der er brug for et ensartet lys. Om himmellyset beskriver Vitruvius en simpel test, hvor der tegnes en linje, det vi i dag kalder himmelgrænseplanet, hvorfra det kan bestemmes hvor himmellyset kommer ind i rummet:

"We must take care that all buildings are well lightened...Hence we must apply the following test in this matter. On the site from which the light should be obtained let a line be stretched from the top of the wall that seems to obstruct the light to the point at which it ought to be introduced, and if considerable space of open sky can be seen when one looks up above that line, there will be no obstruction to the light in that situation." (Morgan, 1960)

Vitruvius beskrivelser af rummenes orientering, i forhold til lysindfald og varmetilskud samt himmellyset i rummet gennem bestemmelse af himmelgrænseplanet, svarer til de grundlæggende principper, vi i dag opererer med, når vi beskriver lyset i forbindelse med design af bygninger. Som i de arkitektoniske eksperimenter understreger Vitruvius betydningen af at eksperimentere med lyset på stedet i 1:1. Han observerer, hvordan lyset påvirker arkitekturen i den specifikke kontekst, for at bestemme hvor lysåbningen skal placeres og hvordan den skal dimensioneres. Her bruger Vitruvius eksperimentet til, med egen krop i en 3D konstruktion, at definere lyset. Samme metode som i Kapitel 3 vi blive demonstreret gennem de 3D mock-ups og modeller, der udvikles i forbindelse med de tre eksperimenter, der udgør empirien i afhandlingen.

Vitruvius kommer ikke ind på samarbejde på tværs af faglige discipliner eller metoder for sammenstilling af viden. Han taler om arkitekten som kunstneren, der selv syntetiserer viden og erfaring i skabelsen af arkitektur. Vitruvius taler derved om arkitektens viden som *crossdisciplinary*, der ifølge Meeth (1978) inddrager viden fra andre fagområder og relaterer disse til sin egen disciplin.

De romerske idealer om orientering i forhold til lys og varme ligger også til grund for *"The Four Books of Architecture"*, hvori den italienske renæssance arkitekt Andrea Palladio (2002) beskriver principperne for arkitektonisk tilblivelse, herunder regler for proportioner af vinduer relateret til observationer af stedet og de bagvedliggende rum:

"It is to be observed in making the windows, that they should not take in more or less light, or be fewer or more in number, than what necessity requires: therefor great regard ought to be had to the largeness of the rooms which are to receive the light from them; because it is manifest, that a great room requires more light to make it lucid and clear, than a small one: and if the windows are made either less or fewer than which is convenient, they will make the places obscure, and if too large, they will scarce be habitable, because they will let in so much hot and cold air, that the places, according to the season of the year, will either be exceeding hot or very cold, in case the part of the heavens which they face, does not in some manner prevent it." (Hawkes, 2008, p.x)

For Palladio er det ikke et ideal at have meget lys, men balanceret lys. Palladios beskrivelser er her observerende og vurderende i forhold til, at lyset fungerer til belysning af rummene, men alligevel beskrivende som anbefalinger.

Renæssancens arkitekter og videnskabsmænd var forbilledlige til at dele viden på tværs af fag, videnskab og praksis. Jamison m.fl. (2011, pp.38- 39) beskriver perioden som "Hybrid imagination 1", hvor *"artists-engineers are working together - a collective creativity"*: De beskriver, de såkaldte *"artist-engineers"*, der i den italienske renæssance miksede forskellige typer viden.

Den kollektive kreativitet kan, ifølge definitionerne fra Meeth (1978), betegnes som interdisciplinær. Arkitekten integrerer forskellige discipliner i en harmonisk sammenhæng, der løser et bestemt problem.

Hvor der for antikkens og renæssancens arkitekter, som Vitruvius og Palladio, var en tilgang, der var båret af filosofisk og intellektuel inspiration, så er det for det tyvende århundrede, blevet et spørgsmål om specialisering og kvantificering, men også et spørgsmål om, i den tidlige modernisme, en fundamental transformation til at skabe et forhold mellem teknik og formsprog (Hawkes, 2008).

I mellemkrigsårene udvikles derfor helt nye idealer og formsprog, der afløser den klassiske tilgang til symmetri og proportioner. Den tidlige modernisme, bliver et eksempel på, hvordan tidens nye idealer for sundhed og den teknologisk udvikling påvirker lyset i arkitekturen. Grundlæggende for perioden var modernisternes definition af lyset som bærende for oplevelsen af rum og tid, som det fremgår af Le Corbusier's berømte citat:

"Architecture is the masterly, correct and magnificent play of masses brought together in light" (Le Corbusier, 1959, p. 31).

Le Corbusier demonstrerer gennem sine bygningsværker idealet i tiden om at bruge lyset som æstetisk design element til blandt andet at frembringe en lethed i bygningsmassen med horisontale vinduesbånd og hjørnevinduer som virkemiddel. Nye glasteknologier og bærende støbejerns- og betonkonstruktioner gjorde det muligt at arbejde med disse elementer i facaderne og skabte et frit formspil i forhold til komposition af lysindfaldet gennem vinduers dimensioner og placeringer i facaden. Der tales om, at vinduet bliver til facaden og at facaden kan ophæve overgangen mellem inde og ude. Den tyske arkitekt Artur Korn beskriver i 1929 den nye facade således:

"..this window is the wall itself, or in other words, this wall is itself a window. And with this we have come to a turning point. It is something quite new compared to the achievements through the centuries...it is the disappearance of the outside wall..." . (Forty, 2000)

Samtidig udvikles og udbredes viden om lysets helbredende effekt i arkitekturen og skaber derved fokus på betydningen af frisk luft og dagslysindtag gennem vinduerne. Arkitekterne inddrog viden fra lægevidenskaben i deres arbejde med at orientere bygningerne og dimensionere vinduerne rigtigt i forhold til lys- og luft indtag. Corrodi m.fl. (2008) beskriver perioden efter første verdenskrig, hvor boliger blev designet efter sloganet "*light, air, sun*", med store og funktionsbestemte vinduesarealer, ikke kun for eliten men for folket.

Også i denne periode var der fokus på at skabe en syntese mellem videnskab og praksis i arkitektfagligheden. Walter Gropius, der var grundlægger af Bauhaus skolen, udtrykte i nedenstående citat fra 1929 betydningen af at kombinere viden på tværs af fag i den skabende proces i lighed med Vitruvius:

"He (the designer) has to adapt knowledge of the scientific facts of optics and thus obtain a theoretical ground that will guide the hand giving shape, and create an objective basis". (Fischer, 1956, pp.15-25)

Bevidstheden om korrekt orientering af bygningen og den frie dimensionering af lysåbningen, eller eliminering af den ydre bærende mur, skabte den modernistiske arkitektur - baseret på lys som design element til at opfylde tidens idealer om sundhed og et kunstnerisk udtryk gennem frie kompositioner af lysåbningerne. De tidlige modernister stolede på udviklingen af nye effektive teknologier til at opretholde et godt indeklima og havde ikke lysets potentiale for energioptimering som væsentlig design parameter. Modernisterne arbejdede med afsæt i deres egen faglighed men inddrog viden fra andre fag i et tværfagligt, *crossdisciplinary* regi i Meeths definition af begrebet, hvor de havde forståelse for nye teknologier og de muligheder de skabte i arkitekturen. (Meeth, 1978)

Perioden efter 2. Verdenskrig beskrives af Jamison (2011) som en konstruktiv og kvantitativ fase, der var knyttet til anden verdenskrig. Perioden var præget af en særlig relation mellem videnskab, teknologi og samfund. I denne periode blev forskerne støttet i at producere våben, raketter osv., en udvikling med fokus på specialisering og ekspertise. Fra 1940'erne og op gennem 1960'erne hævder Jamison, at der var fokus på produktion af viden, "*based on disciplinary identities and academic values*" (Jamison, 2011, p. 16).

Denne fokusering på produktion og kvantitative værdier ses i byggeriet i efterkrigsårene, som følge af den gennemgribende industrialisering byggeriet gennemgår. Hawkes skriver, at udviklingen af byggeriet i det 20 århundrede blev et spørgsmål om specialisering og kvantificering og understreger betydningen af at fremhæve det kvalitative:

*“It is now possible to design buildings in which quantitatively and precisely specified environments can be delivered by calculated configurations of building fabric and mechanical plant. But this success has, it seems, often been bought at a high price. My concern hinges around the **emphasis of the qualitative as the principal object of environmental design**, around precisely the conflict of the measurable and the unmeasurable expressed by Louis Kahn....I hope this will demonstrate that quantification and mechanization may co-exist with poetic interpretation of the nature of the architectural environment”.* (Hawkes 2008, P. xiii)

Hawkes (2008) skriver også om nødvendigheden i at opleve direkte, ved at bruge sanserne som instrument i udforskningen af lys og rum i arkitekturen. Han går så langt, at han siger, at denne slags forskning ikke kan gennemføres med billeder og verbale beskrivelser og at det eneste pålidelige instrument for at observere er menneskelige sanser.

Beskrivelser af lysets kvalitative værdier udvikles blandt andre af den amerikanske arkitekt Louis Kahn (1969). Sidst i 1960'erne giver Kahn forelæsninger og skriver om betydningen af en kvalitativ tilgang til lyset i arkitekturen ved at beskrive forholdet mellem det målbare og det ikke målbare (*the measureable and the unmeasureable*) i den kreative proces:

“I only wish that the first really worthwhile discovery of science would be that it recognized that the unmeasurable is what they're really fighting to understand, and that the measurable is only the servant of the unmeasurable; that everything that man makes must be fundamentally unmeasurable” (Kahn, 1969)

Kahn gav en forelæsning på School of Architecture, Pratt Institute i Brooklyn, New York i 1973. Her talte han om den skabende proces eksemplificeret gennem poeten og videnskabsmanden. Kahn beskriver, hvordan de hver især arbejder med de målbare og de ikke målbare parametre:

“Where is the scientist and where is the poet? The poet is one who starts from the seat of the unmeasurable and travels towards the measurable, but who keeps the force of the unmeasurable within him at all times. As he travels towards the measurable, he almost disdains to write a word. Although he desires not to say anything and still convey his poetry, at the last moment he must succumb to the word after all....The scientist has unmeasurable qualities as a man, but holds his line and does not travel with the unmeasurable because he is interested in knowing. He is interested in the laws of nature, so he allows nature to come to him, and then he grabs it because he can no longer stand the difficulty of holding back. He receives knowledge in full and works with this, and you call him objective.

But Einstein travels like a poet. He holds to the unmeasurable for a long, long while because he is a fiddle player. He also reaches nature of Light at its very doorstep. Because he only needs a smidgen of knowledge from which he can reconstruct the universe. He deals with Order and not with knowing. No piece of knowing, which is always fragmentary, is enough for a person who is truly a visionary like Einstein. He would not accept knowledge unless it belonged to all knowledge, and therefore he so easily wrote his beautiful formula of relativity. Thus, he could lead you to a sense of all of Order, which knowledge is really answerable to." (Lobell, 2008)

Kahn beskriver den visionære videnskabsmand, Einsteins evne til at "travel like a poet" ved at fastholde det ikke målelige og samtidig "he deals with order and not with knowing". Han skaber en orden, en systematik til at forstå viden i en større sammenhæng, "belonged to all knowledge". Beskrivelsen er et fint billede på det der afsøges i denne afhandling gennem det arkitektoniske eksperiment. I Kapitel 3 beskrives, gennem observationerne af de tre eksperimenter, hvordan der søges en systematik for den viden om lys, der tilføres gennem de tre kriterier. Således kan viden forstås i en større sammenhæng på tværs af disse kriterier, og derved skabe rum til udvikling af både de kvantitative og de kvalitative værdier.

Den danske arkitekt Steen Eiler Rasmussen skriver i 1959 "Om at opleve arkitektur", som i 1964 oversættes til "Experiencing Architecture". I kapitlet, "Daylight in Architecture", giver Rasmussen meget observerende og præcis karakteristik af hvordan dagslyset viser sig som et oplevet element i arkitekturen og om hvor svært det er at arbejde kunstnerisk med lyset, da det ikke kan kontrolleres:

"Daylight is constantly changing. The other elements of architecture we have considered can be exactly determined. The architect can fix dimensions...daylight he cannot control....How is it possible to work with such a capricious factor? How can it be utilized artistically?" (Rasmussen, 1962, p. 196)

I kapitlet beskrives på enkel vis og med en fænomenologisk tilgang, kompleksiteten i fænomenet at et evigt foranderligt lys tilmed skal forholdes til vore øjnes fantastiske evne til at justere sig efter forholdene. For en beskrivelse af lyset definerer Rasmussen tre rumtyper: den store åbne hall, rummet med ovenlys samt rummet med et sidelys. I disse rumtyper gives en karakteristik af hvordan lyset kommer til udtryk.

En anden betydningsfuld arkitekt, der med en fænomenologisk tilgang beskriver lys i arkitektur gennem udtryk for erfaring og den menneskelige eksistens i tid og rum, er den finske arkitekt og professor Juhani Pallasmaa. Hans essay "The eyes of the skin: Architecture and senses" (2012) er baseret på personlige observationer og refleksioner. Pallasmaa udtrykker sig om forholdet mellem de menneskelige sanser og arkitektur. Lys og varme fra solen er grundelementer i hans beskrivelser, hvor hans hovedbudskab er, at vi sanser arkitektur med alle vores sanser ikke blot synet. Her bliver lyset et element for såvel syns- som følesansen:

"When the sun is warm on my face and the breeze is cool, I know it is good to be alive. Gravity is measured by the bottom of the foot; we trace the density and texture of the ground through our soles. Standing barefoot on a smooth glacial rock by the sea at sunset, and sensing the warmth of the sun-heated stone through one's sole, is an extraordinarily healing experience, making one part of the eternal cycle of nature. One senses the slow breathing of the earth". (Pallasmaa, 2012, p. 62)

Pallasmaa har en poetisk beskrivelse af vinduet som lysfiltrerende element, der kan stimulere drømme og imagination fremhæver poesien i det filtrerede lys:

"The imagery of the window and the door ..."the window of a room of dreaming has to be shaded by curtains or closed with shutters. Dim light and unfocused vision stimulate dreaming and imagination"; Pallasmaa (2012, p. 130)

Beskrivelsen kan relateres til poesien forsøgt fremkaldt i lysets filtrering i de transparente solceller i de to første af de tre eksperimenter i denne afhandling. Mens disse er fremkaldt ved hjælp af ny energiteknologi advarer, Pallasmaa mod ny teknologi, herunder glasfacader:

"These products of instrumentalised technology conceal their processes of construction, appearing as ghostlike apparitions. The increasing use of reflective glass in architecture reinforces the dreamlike sense of unreality and alienation. The contradictory opaque transparency of these buildings reflects the glaze back unaffected and unmoved; we are unable to see or imagine life behind these walls. The architectural mirror, that returns our gaze and doubles the world, is an enigmatic and frightening device." (Pallasmaa, 2012, p. 34)

Pallasmaa placerer sig mellem to perioder, den analoge og den digitale. *"The eyes of the skin"*, der udkom første gang i 1996, har Pallasmaa skrevet hånden. Den tredje udgave, der udkom i 2012, udkom både trykt og digital. Pallasmaa beskriver hans skrive proces således: *"I write the same way as I design though eight to ten successive long-hand manuscripts...I need to see my own, almost illegible handwriting on the paper.."* (Pallasmaa, 2012, p. 81)

Pallasmaa understreger computerens begrænsninger, idet skærbilledet er to-dimensionalt og mennesket er skabt til at mærke rummet med flere sanser end synssansen, som er den eneste aktive på skærmen. I introduktionen til andel del i *"The eyes of the skin"* ridser Pallasmaa problemstillingen op omkring integration af teknologi i udviklingen af arkitektur:

"The negative development in architecture is, of course, forcefully supported by forces and patterns of management, organisation and production as well as by the abstracting and universalising impact of technological rationality itself." (Pallasmaa, 2012, p. 43)

Arkitekter som Kahn, Pallasmaa og Rasmussen arbejder med en fænomenologisk tilgang, der giver en oplevet karakteristik af lyset, der retter bevidstheden mod, hvordan tingene viser sig. De arbejder i høj grad med afsæt i deres egen faglige disciplin og akademiske værdier og tager afstand til den kvantitative teknologiske udvikling.

Ifølge Jamison (2011) sker der i 1970'erne og frem et skift i forholdet mellem teknologi, videnskab og samfund, hvor der inddrages samfundsvidenskab i de teknologiske diskussioner. Videnskab kommer ifølge Jamison i flertal, og betegnes som videnskaberne. Der sker studenteroprør på såvel universiteter som på Kunstakademiets Arkitektskole i København, hvor der gøres op med de traditionelle professorvælder og den klassiske akademiske tilgang. Jamison (2011) beskriver, at viden i stedet relateres til en kontekst i regi af samfundet og forskningskulturen derved bliver hybrid, der opstår nye samarbejdsrelationer, ligesom videns udvikling bliver mere eksperimenterende.

Den eksperimenterende tilgang afspejles i arkitekturen gennem lysten til at udfordre samspilet mellem lys, materialer og teknologier.

"Instead of trying to solve new problems with old forms, we should develop new forms from the very nature of the new problems....I discovered by working with actual glass models that the important thing is the play of reflections, and not the effect of light and shadow as in ordinary buildings". (Rohe, 1992)

Mies van der Rohe opdager, at ved at arbejde med nye materialer i modeller opstår der oplevelser af, hvilke effekter lyset kan skabe i materialet, idet han iscenesætter det på en ny måde og tester det gennem modellen. Tidligere har lyset primært været behandlet som lysåbningen, her introduceres potentialet i at arbejde med lysets refleksioner i materialet, som et arkitektonisk motiv.

De amerikanske arkitekter Rowe og Slutzky skriver i 1963 *"Transparency: Literal and Phenomenal"* (Rowe, 1963). Her benytter de begrebet fænomenbunden transparens til at beskrive de mange lag og betydninger i oplevelsen af lysets spil i glas i arkitekturen samt bogstavelig transparens til beskrivelse af det fysiske glas. Rowe og Slutzkys definition af transparens er i denne afhandling udvidet til også at benytte begrebet menings transparens, hvilket uddybes i Kapitel 3. Disse begreber bliver i afhandlingen benyttet til at beskrive de æstetiske potentialer i de transparente glasfacader og solceller, hvilket er udfoldet i artiklen *"Den transparente energiproducerende glasfacade"* [5].

Den amerikanske arkitekt Lisa Heschoung skriver i 1979 på baggrund af hendes bacheloropgave bogen *"Thermal Delight in Architecture"*. En beskrivelse af hvordan tekniske parametre til at optimere indeklimaet kan skabe arkitektonisk kvalitet, hvis de inddrages i den tidlige fase af design processen. Heschoungs observationer er oplevede med reference til værker fra arkitekturhistorien. I forordet skriver Heschoung: (1979, p.vii)

"This work began with the hypothesis that the thermal function of a building could be used as an effective element in design. Thermal qualities - warm, cool, humid, airy, radiant, cozy - are an important part of our experience of a space; they not only influence what we choose to do there but also how we feel about the space. An analogy might be drawn with the use of light quality as a design element, truly a venerable old architectural tradition. The light quality - direct, indirect, natural, artificial, diffuse, dappled, focused - can be subtly manipulated in the design of a space to achieve the desired effect...."

Rohe, Rowe & Slutzky og Heschoung er få blandt mange eksempler på, at der udvikles nye arkitektoniske potentialer ved at inddrage viden om lys gennem en multidimensionel tilgang til lysets relation til materialer og teknik. Denne tilgang åbner for, at der arbejdes på tværs af fag og at forskellige faggrupper inddrages i design processen.

LYS I EN BÆREDYGTIG UDVIKLING

I det 21. århundrede skaber den øgede fokus på energi optimering af byggeriet behov for at lyset inddrages på tværs af fag for derved at skabe nye løsninger mod en bæredygtig udvikling.

Udtrykket en "bæredygtig udvikling" (*sustainable development*), er defineret i det meget benyttede citat fra Brundtland rapporten "Our Common Future" fra the United Nations World Commission on Environment and Development (WECD), der blev publiceret i 1987:

"Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (United Nations World Commission on Environment and Development 1987, p. 24)

Her rykkes fokus fra forsyningssikkerhed og national økonomisk fordelagtig energiforsyning til målet om at skabe en holistisk bæredygtig udvikling til gavn for nuværende og kommende generationer. Citatet skaber definitionen for, at en bæredygtig udvikling skal ske på tværs af nationaliteter, interesser og ikke mindst fag. En udvikling, hvor 'our common future' og 'our needs' er i centrum, - en vision, der beskriver, hvorfor vi skal finde løsninger frem for hvordan og ikke mindst en vision, der understreger "vores fælles fremtid" og ikke individuelle interesser. Brundtland rapporten er et eksempel på den transdisciplinære tilgang, der er særlig relevant for videns produktion og design i relation til en bæredygtig udvikling.

Fokus på forsyningssikkerhed og reducere af CO2 udslip har skabt stor opmærksomhed på energioptimering i byggelovgivningen, hvilket gennem de seneste 40 år har været en design parameter, der har påvirket det arkitektoniske formsprog. I artiklen "Dagslys og energioptimering i boligen" [7] gennemgås udviklingen af vinduet og dets indflydelse på energitilførsel og dagslysindtag i det danske parcelhus og det belyses, hvordan dette er påvirket af lovgivningen. Herunder 70'ernes oliekrise der medfører 'kolde stuer' og 80'ernes 'glukhulsarkitektur' som konsekvens af lovgivningen om max 15% vinduesareal. En lovgivning, der er én-dimensional, idet den udelukkende beskriver et vinduesareal uden at bidrage til en vurdering af dagslysets kvantitet eller kvalitet i rummene. Denne lov skaber derved reduktion af lys og varmetilskud for at sikre høj varmeisolering. Det var et stort skridt, da indførelsen af energirammeberegninger kom i 2006. Den giver mulighed for at beregne såvel varmetab som varmetilskud gennem vinduerne, hvilket åbner for muligheden for at arbejde med forskellige typer vindueskonstruktioner, formater og ruder optimeret i forhold til individuel orientering og behov. Her arbejdes med to dimensioner, både varmetab og varmetilskud.

Artiklen beskriver, hvordan energiramme-beregninger motiverer industrien til udvikling af vinduer med smallere ramme-karm konstruktioner og bedre isoleringsevne kombineret med bedre varme- og dagslysindtag. Denne udvikling viser vejen frem mod energi-plus vinduer, hvor varmetilskuddet i opvarmingsperioden er højere end varmetabet ud gennem vinduet. Det beskrives også hvordan disse energioptimerede vinduer skaber større arkitektonisk frihed bl.a. fordi der ikke længere er kulde nedfald omkring disse.

I 2002 formuleres i EU '*Energy Performance of Buildings Directive*', der sætter målet at alle nye bygninger i Europa i 2020 er 'nearly zero energy buildings'. Danmark vedtager i 2008 en national energiaftale, hvor energiforbruget skal reduceres med 25% i 2010, 2015 og 2020. Herved får Danmark omsat EU's mål om at nye bygninger i 2020 er 'nearly zero energy buildings'. (Energistyrelsen 2011).

Målet om at nybyggeri i 2020 skal være 'nearly zero energy' retter fokus mod en kvantificering gennem tekniske beregninger og integration af energi-optimerende og energi-producerende teknologier. Fokus rettes på specialisering og tekniske miljøer, hvilket i lighed med efterkrigsårenes industrialisering stiller store krav til metoder til definering af kvalitative værdier, der parallelt i design processen kan syntetiseres med de tekniske imod en helhedsorienteret bæredygtig udvikling af byggeriet. Det åbner for udvikling af nye strategier for samarbejde på tværs af fag, hvor viden skal kombineres og udvikles og skabe helt nye løsninger på problemer, der vedrører os alle på individuelt, lokalt og globalt plan.

Ifølge Wall m.fl. (2008) forbruger vi i eksisterende bygninger over 40% af verdens samlede primære energiforbrug og 24% af udledningen af drivhusgasser. En kombination af at gøre bygninger mere energieffektive og bruge en større andel af vedvarende energi er derfor et centralt emne for at reducere det ikke-vedvarende energiforbrug og drivhusgasemissioner.

Hvor lyset tidligere har været et kvalitativt design element, repræsenterende de bløde værdier, med reference til Pallasmaa, Kahn og Rasmussen, bliver lyset nu et middel til at energioptimere, de kvantitative værdier fremhæves derved. Der er gennem 00'erne udviklet viden om, hvordan man kan designe huse, der har et minimalt energiforbrug til opvarmning. Et mekanisk ventilationssystem med varmegenvinding og en meget tæt og varmeisoleret bygningskrop minimerer varmebehovet til at det kan tilføres som passiv varme gennem primært sydvendte vinduer. Der findes eksempler på, at lyset i denne type byggerier har været behandlet som et endimensionelt design element, udelukkende for passiv varmetilskud, hvilket har resulteret i store vinduesarealer mod syd og minimale eller ingen lysindtag fra nord, hvilket giver et unuanceret dagslys samt risiko for overophedning.

Denne viden forsøges nu kombineret med mulighed for at forbedre indeklimaet ved at tilføre mere frisk luft. Samt ved at regulere varmetilførsel gennem udvendig afskærmning og ved at skabe et mere kvalitativt differentieret dagslys, hvor rummenes udtryk, inde-ude relationer og andre arkitektoniske virkemidler er vægtet. Denne optimering af vinduet er beskrevet i artiklerne [1], [2], [3] og [4]. Ligeledes arbejdes der med hvordan nye energiproducerende teknologier som solceller kan udvikles til at eksponere lysets multidimensionale kvaliteter ved på en gang at producere energi, skabe et godt indeklima og gode dagslysforhold, hvilket er beskrevet i artiklerne [7], [8], [9], [10].

Disse parametre for lyset er kontekst specifikke og baseret på synteser mellem design, teknologi og kontekst, som skaber et særligt behov for at arbejde på tværs af fag for udvikling af det Jamison kalder "environmental knowledges":

"For one thing, environmental knowledge is inherently interdisciplinary. In order to understand environmental problems, it was necessary to combine knowledge from different fields of science and technology, and especially to transgress the boundaries between the natural sciences and the social and human sciences." (Jamison 2010, p.14)

Da denne viden på tværs af faglige discipliner skal transformeres til en fælles ny viden, kan samarbejdet betegnes som **transdisciplinært**, hvilket ifølge Meeth er det højeste niveau til at integrere viden. Her går man ud over faggrænser, idet de starter med problemet og går mod en løsningsorienteret tilgang. Det betyder, at viden bruges til at bidrage med en løsning. Metoder til definition og sammenstilling af viden på tværs af fag er beskrevet i artiklerne [2], [6] og [7]

Dette underbygges af Hawkes, der definerer den bæredygtige udvikling, ikke kun som teknisk men som et samarbejde mellem poetiske intentioner og tekniske mål. Hawkes belyser relationerne mellem det tekniske og poetiske i miljømæssig design af arkitektur og går videre og siger, at de tekniske aspekter i arkitekturen understøtter poesien:

"...the significant environmental propositions in architecture rest upon acts of imagination in which technics are brought to bear in the service of poetic ends...I hope this will demonstrate that quantification and mechanization may co-exist with a poetic interpretation of the nature of the architectural environment". (Hawkes 2008 p.xiii)

LYS OG ENERGI PERSPEKTIVERET I EGNE PUBLIKATIONER

Transparente solceller er valgt som case til at udforske, hvordan en teknologi, der ellers var udviklet i efterkrigsårene, i tråd med ovenstående historiske gennemgang, som en specialiseret teknologi til rumindustrien, kan illustrere, hvordan teknologi kan understøtte poetiske værdier, *"to bear in service to poetic ends"*, som Hawkes (2008) formulerer det i citatet ovenfor. Ved at ændre fokus fra en avanceret teknologi til byggekomponenter, der skal skabe værdi for brugeren, er der især et potentiale for at arbejde med de lys transparente solcellekomponenter og -teknologier. Her skabes mulighed for at arbejde med lyset som et multidimensionalt design element, ved at definere værdier ud over de tekniske, så som den poetiske oplevelse af at høste solens energi og samtidig skabe en ornamentik via lysets spil i materialerne. Det har været temaet i eksperiment 1 og 2, der udgør to af de tre eksperimenter i denne afhandling. Nedenfor opridses hvordan lys som multidimensionelt design element er udforsket, med transparente solceller som case. Artiklerne udgør en del af denne afhandling.

Slut-rapportenden "*SOLcelle og -lys - et arkitektonisk potentiale. Idégrundlag for hvordan solceller og sollys kan spille sammen*" [10] er udarbejdet på et tidspunkt, hvor eksempler på bygningsintegration af solceller var få og sjældent referencer som arkitekter fandt relevante at lade sig motivere af. Derfor var målet, at skabe en ny tilgang til et teknisk produkt ved at beskrive lysets multidimensionale værdier gennem den spektrale selektivitet i en transparent (solcelleintegreret) facadekomponent. Der illustreres hvordan lyset transmitteres gennem ruden og bidrager med lys og varme. Samtidig vises det, hvordan lyset reflekteres i glasset og solcellernes materialer og derved skaber spejlinger og dybde og endelig hvordan lyset absorberes i solcellens materiale og omdannes til elektricitet. Sammenstillet med en beskrivelse af lysets og glassets betydning og potentialer i arkitekturen peges på nye arkitektoniske potentialer i transparente solceller.

I artiklen "*Fra Rumteknologi til Bygningskomponent - om udviklingen i solcelleteknologien*" [9] defineres mulighederne for tværfagligt samarbejde om udvikling af bygningsintegrerede solceller i et nationalt regi. Med reference til studenterkonkurrencer, udviklingsprojekter og nationale støtteprogrammer illustreres den udfordring og mulighed, der er hos arkitekter, for at indgå i tværfagligt samarbejde, hvor produkterne udvikles med den kompleksitet og flerfunktionalitet, der kræves af nye bæredygtige byggekomponenter.

I "*Udvikling og visioner*" [8] udfoldes hvordan solcellers arkitektoniske potentialer udforskes gennem nationale studenterkonkurrencer, workshops på arkitektskoler, et Ph.d. projekt og demonstrationsprojekter. I disse projekter er lyset som teknisk og arkitektonisk virkemiddel bærende for udviklingen.

I "*Solceller - et udviklingsperspektiv*" [7] beskrives udviklingen af solcelleteknologien frem mod 3. generations tyndfilmceller, der åbner for produktionsfrihed og derved større mulighed for integration af arkitektoniske værdier såsom lystransmission i de solcelleintegrerede ruder.

Ud over arbejdet med lysets potentialer i udviklingen af teknologier og komponenter, har lys været udforsket i processen mod at designe en bygning. Hawkes (ref..) definition af "*poetic intentions and technical means*" har dannet inspiration for artiklen: "*The window a poetic device and technical tool*". [2] Her diskuteres det, hvordan dagslys kan være et multidimensionelt design element ved at teste hypotesen, at en holistisk tilgang til vinduet som designelement kan blive brugt som både et poetisk element og et teknisk redskab i designet af energiplus boliger. For at teste dette, er data indhentet gennem metoder fra flere traditioner og fag såsom tekniske målinger, registreringer af brugernes oplevelse af at bo i huset samt metoder til at indfange lysets påvirkning af rum og materialer gennem fotoregistreringer og modeller.

I den seneste artikel, der indgår i denne afhandling, "*Home smart Home - A Danish Energy Positive Home Designed with Daylight*", [1] beskrives det, hvordan nye intelligente teknologier integreret i boligen, og specielt i forbindelse med vinduet, kan skabe udfordringer og muligheder for at designe bygninger, der skaber det bedst mulige forhold for såvel mennesker som miljø. Mod en tværfaglighed, med reference til Jamison et.al (2011), adresseres interaktionen mellem dagslys defineret gennem tekniske termer og dagslys defineret som oplevet gennem brugernes beskrivelser og arkitektoniske observationer.

Disse artikler er beskrevet yderligere i kapitel 3, i forbindelse med gennemgangen af metoder og proces i eksperiment 3, Home for Life.

Ovenstående udvalg af egne artikler belyser, hvordan lys har potentiale til i at indgå i design af energiproducerende teknologi, komponenter og bygninger som et multidimensionelt design element, hvor der deles viden på tværs af fag.

RESUMÉ - lys forbinder viden

Lys har siden antikken været et betydningsfuldt design element i arkitekturen. Igennem ovennævnte design tilgange, stilperioder og referencer til egne artikler, fremgår det, at lyset indgår i design processen som både et oplevet element og som et praktisk og teknisk virkemiddel, der er defineret ved hjælp af mange fagligheder og tilgange, der kan betegnes som multidimensionelle. Sammenfattende for kapitlet er, at der er potentialer i at udvikle modeller for, hvordan lyset udfoldes som **multidimensionelt design element**, hvor såvel kvalitative som kvantitative værdier kan defineres og udvikles i **transdisciplinære** design processer.

Arkitekter og lysdesignere har specialiseret sig i at definere kvalitative værdier til beskrivelse af lysets kvaliteter, ligesom der er defineret værktøjer til kategorisering af lysets påvirkning af mennesker og miljø, hvilket demonstrerer hvordan lyset kan fungere som et multidimensionalt design element. Der er ingen af disse definitioner og værktøjer, der udvikler modeller til syntetisering af værdikriterier i design processen, hvilket er sigtet med denne afhandling.

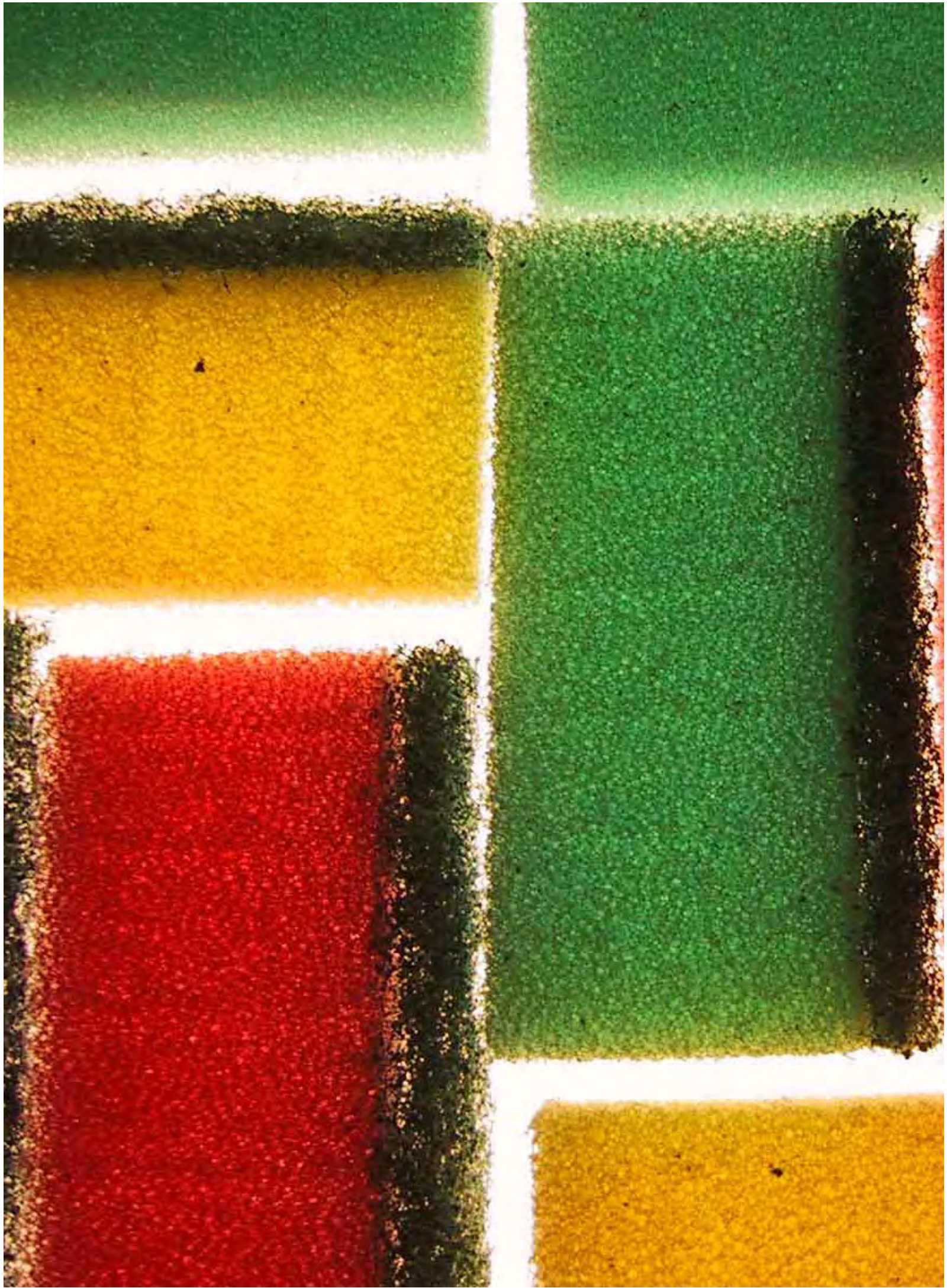
I den historiske perspektivering beskrives det, hvordan der helt tilbage i antikken skrives om betydningen af at arkitekten har en tværfaglig viden baseret op såvel praktisk færdighed som teoretisk dannelse, hvor lyset både måles og observeres. Beskrivelserne af arkitektens samarbejdsform i antikken er *crossdisciplinary*. I den tidlige modernisme gives afkald på symmetri og orden til fordel for fri komposition og tilførsel af lys og luft i bygningerne i et æstetisk og sundhedsmæssigt perspektiv. Her inddrages også viden i *cross disciplinary teams*. Efterkrigsårene afspejler en tid, hvor industrialisering og rationalisering driver arkitekter til at specialisere sig og definere de oplevede og kvalitative kvaliteter ved lyset i arkitekturen. Fra 1970'erne skabes der en større sammenhæng mellem videnskaberne og lyset sættes af arkitekter i spil i forhold til materialer i et multidisciplinært regi. Endelig er der i det 21. århundrede fokus på forsyningsikkerhed og minimering af Co2 udslip, hvilket skaber øget fokus på lystets kvantitative potentialer for energioptimering. Der opstår muligheder for at udfolde lyset i såvel et teknisk som et poetisk perspektiv gennem transdisciplinært samarbejde i "a hybrid imagination".

Til udvikling af nye energi-optimerede og energi-producerende teknologier, materialer og produkter, er der et særligt behov for at lyset iscenesættes gennem inddragelse af kvalitativ og kvantitativ viden på tværs af faglige grænser. Gennem resume af egne artikler beskrives muligheden for at udforske lysets potentiale for aktiv energiproduktion gennem bygnings-integrerede energiteknologier som solceller. Desuden beskrives vinduesindustriens udvikling af energieffektive ruder, der minimerer varmetab, og som i nogle tilfælde kan generere mere passiv varme i opvarmningsperioden end de afgiver – derved bliver vinduet i sig selv

en passiv energikilde der skal inddrages i design processen. I denne type projekter opstår der en mulighed for at afsøge lysets potentialer som multidimensionalt design element. I denne afhandling søges dette besvaret gennem transdisciplinære processer i arkitektoniske eksperimenter.

Endelig er et gennemgående tema i dette kapitel beskrivelsen af potentialet i at definere visioner og imagination, - at spørge "hvorfor" før der spørges "hvordan". Lam (1977) taler om "*Positive biological needs for universal information*", Vitruvius (Morgan,1960) taler om "*the things signified, and that which gives it its significance*". Brundtland rapporten, der taler om at vi skal skabe "*en bæredygtig udvikling til gavn for nuværende og kommende generationer*" (United Nations 1987). Hawkes (2008) taler om "*Environmental Imagination*" og Jamison (2011) om "*Hybrid Imagination*". Endelig er Albert Einstein citeret for at sige: '*Imagination is more important than knowledge*'. Alle disse udsagn taler for, at der defineres visioner for eksperimenter. Visioner der bygger på "*the qualitative parameters based on experience - a full understanding of the human condition*" som Pallasma (2012) formulerer det. Visioner motiverer til at potentialerne i lyset kan udfolde. Idet eksperimentet bygger på formodninger, der undersøges, må det være muligt at udvikle formodninger, der tager afsæt i en vision, der skaber mening og motivation hos de personer, der i transdisciplinære teams skal bryde ud af deres fags komfort zone for sammen at finde nye løsninger, drevet af en mission udsprunget af visionen.

I kapitel 3 beskrives processerne i eksperimenterne, for en illustration af, hvordan lyset indgår som multidimensionalt design element i en videns baseret kreativ design proces. Disse beskrives gennem proces modeller. Herunder belyses det, hvordan vision og imagination har været brugt i eksperimenterne til at skabe fælles motivation i den tværfaglige proces.





3. TRE EKSPERIMENTER

- videns baserede design processer

3. TRE EKSPERIMENTER

- vidensbaserede design processer

I forrige kapitel er lys som multidimensionalt design element perspektiveret gennem referencer til arkitekturhistorien, egne publikationer og eksempler på metoder og temaer indenfor lys design og samarbejdsformer. Lys som design element er diskuteret i forhold til, hvordan viden om lys kan integreres i design processen, for derved at optimere en bæredygtig udvikling. Det er argumenteret, at lysets multidimensionelle potentialer kan komme i spil i design processen, når viden fra flere fagområder kombineres og transformeres i transdisciplinære processer.

I dette kapitel udfoldes det empiriske materiale i afhandlingen, de tre eksperimenter, med henblik på at undersøge, hvordan disse processer bidrager til, at viden om lys inddrages på tværs af fag i processen og motiverer såvel en kreativ proces samt producerer ny viden. De tre eksperimenter er gennemført i perioden 2001-2011, med forfatteren som forsker og underviser på arkitekuddannelser og som projektleder i byggeindustrien. I disse processer er metoder udviklet med henblik på at optimere en sammenstilling af viden og samarbejde på tværs af forskning, undervisning, industri og udviklingsmiljøer for udviklingen af energiproducerende teknologier, komponenter og bygninger.

Motivationen har været, at flytte fokus fra en løstrevet teknologi eller fysisk komponent til de kriterier, der skaber værdi for mennesker og miljø i en større sammenhæng. Derfor er følgende undertitler defineret for de tre eksperimenter:



Eksperiment 1

"Fra solcelle-teknologi til energiproducerende solafskærmning"



Eksperiment 2

"Fra regulerende komponent til producerende rum"



Eksperiment 3

"Fra komponent til bygning, der giver mere end den tager"

De tre eksperimenter er valgt som empiri for afhandlingen, fordi de demonstrerer processer, hvor forfatteren har oplevet et kvalitativt og frugtbart samarbejde ved at inddrage viden fra forskellige fagområder i den kreative design proces. I alle tre forsøg, og især i EX3 er erfaringen, at projekterne er drevet af motivation og engagement fra partnerne.

Eksperimenterne viser, at indarbejdelse af viden på tværs af fag, kan ske ved at definere kriterier i hvert eksperiment. Gennem forskellige metoder udvikles og syntetiseres disse gennem kreative processer, som at bygge modeller.

I relation til afhandlingens hovedspørgsmål; *hvordan kan lys som multidimensionelt design element motivere en kreativ design proces og generere ny viden, der understøtter en bæredygtig udvikling?* stilles med henblik på en analyse af processerne i dette kapitel to underspørgsmål:

Hvordan kan viden om lys fra forskellige discipliner motivere en kreativ proces?
Hvilken ny viden genereres i de tre eksperimenter?

De tre eksperimenter er alle udviklet med en *"tacit vision"* om at forbedre vores byggede miljø gennem vidensdeling på tværs af fag i design processen. I alle tre eksperimenter er der fokus på at bruge lysets potentialer ved at høste energien fra solen, bidrage med et godt lysindtag og behageligt indeklima og lade lys og skyggespil skabe udtryk gennem materialer, rumligheder og tid. jf. Kapitel 2.

For at udforske mulighederne i at arbejde med lys som multidimensionelt design element arbejdes der i EX1 og EX2 med transparent solcelleteknologi. Solcelleteknologi er udviklet i forbindelse med rumindustrien, hvor kun tekniske værdier er indarbejdet i udviklingsprogrammet med fokus på effektivitet og løsninger for materialernes holdbarhed. Senere er denne teknologi forsøgt overført til bygningsintegration. Dette efterlader en god case om en teknologi, hvor der er muligheder for, i udviklingen af nye solcelleteknologier, at integrere arkitektoniske potentialer og derved udvikle energiproducerende bygningskomponenter i stedet for teknologier. De arkitektoniske potentialer i transparente solceller er perspektiveret i Kapitel 2 samt uddybet i artiklerne [7], [8], [9] og [10].

I disse eksperimenter har målet været, at integrere de tekniske parametre på en måde, hvor de gennem processen fremkalder nye former for visuelle oplevelser gennem lysets og skyggernes spil i materialet og derved tilføjer nye arkitektoniske potentialer ud over at producere energi.

Det har været en løbende proces, at udvikle metoder og processer for, hvordan viden på tværs af fag integreres og syntetiseres. Et fokusområde har været, at observere, hvordan en teknologi ændrer sig, når den implementeres – og hvordan udviklingen af teknologi og komponenter ændres, når arkitektoniske værdier knyttes til udviklingsprogrammet. Således er der i EX1 arbejdet med at definere arkitektoniske værdier til integration i udviklingsprogrammet for en ny solcelle teknologi. Mens der i EX2 er udviklet strategier for, hvordan der kan fremkaldes arkitektoniske potentialer ved at implementere eksisterende solcelle paneler i forskellige arkitektoniske kompositioner. Endelig er der i EX 3 arbejdet med, hvordan både eksisterende og nye produkter kan sammenstilles og testes i en bygning.

De tre eksperimenter repræsenterer således tre forskellige skalaer, såvel som forskellige stadier i design processen og forskellige problemstillinger indenfor emnet. Fra udvikling af morgendagens solcelleteknologi over definition af arkitektoniske potentialer i kommercielle solcellekomponenter til design af en bygning ved sammenstilling af komponenter og teknologier.

For en systematisk redegørelse er der defineret fire hovedprincipper, som benyttes til at beskrive og sammenligne processerne i de tre eksperimenter.

1. Vision: En fælles vision for projektet, som er afsæt for definition af de tre kriterier.

2. Criteria: Tre kriterier, som repræsenterer viden indenfor forskellige fagområder, funktioner og kulturer. Denne viden udvikles gennem øvelser, modeller og begreber og sammenstilles i matrix.

3. Construction: Kriterierne syntetiseres gennem design og konstruktion af modeller og mock-up.

4. Evaluation: Designs evalueres på baggrund af kriterierne.

Beskrivelsen af proces og metoder i de tre eksperimenter nedenfor er defineret indenfor ovenstående hovedprincipper og sammenfattes i proces-modeller indeholdende disse principper.

For en beskrivelse af forskellen i eksperimenterne kategoriseres de tre eksperimenter indenfor Schöns definition af tre typer eksperimenter: *The Explorative Experiment, the Move-testing Experiment and the Hypothesis Testing Experiment*. (Hansen 2013) jf. Kapitel 2.

For en beskrivelse af samarbejdsformer benyttes definitionerne af Meeth indenfor betegnelserne: *Transdisciplinary, interdisciplinary, multidisciplinary og cross disciplinary*. (Kofoed 2013) jf. Kapitel 2.

Beskrivelserne af processer og metoder er baseret på dokumentation fra afhandlingens publikationer, projekt- og kursusbeskrivelser, design resultaterne samt slutrapporter. Endelig er beskrivelserne baseret på observationer fra forfatteren, som har været projektleder og udviklet metoder og processer, som en del af de forsknings- og udviklingsprojekter, de tre eksperimenter har været en del af.

EXPERIMENT 1

Fra solcelleteknologi til energiproducerende solafskærmning

Om at udvikle arkitektoniske parametre til fremtidens PEC-celler (PhotoElectroChemical solceller).

I forbindelse med projektet *"Transparente solceller - fremtidens elproducerende solafskærmning"* er der i perioden januar 2004 - december 2005 gennemført fire workshops, tre på Arkitektskolen Aarhus og en på Kunstakademiets Arkitektskole i København. Sammenlagt har 60 studerende deltaget. Disse workshops danner i denne afhandling grundlag for EX1.

Partnere og vidensområder er:

Arkitektskolen Aarhus: viden om kreative processer til fremkaldelse af arkitektoniske potentialer i transparente facader.

Teknologisk Institut: Taastrup, viden om termisk indeklima og måling af dagslys

PEC Group, Taastrup: Viden om solcelleteknologi generelt og PEC-teknologi specielt

For en detaljeret beskrivelse af projektet se rapporter:

"Transparente solceller - fremtidens el-producerende solafskærmning. Slutrapport for PSO F&U projekt 4770" (Teknologisk 2006) og *"Slutrapport - arkitektur - Transparente solceller - fremtidens energiproducerende solafskærmning 2004"* (Arkiv, 1) samt publikationerne [5], [8], [9], [10].

I tæt samarbejde med PEC Group, Teknologisk Institut er viden om de vinkelselektive PEC solceller, også kaldt Grätzel Cells, blevet udvekslet med undervisere og forskere på Arkitektskolen Aarhus. PEC Group arbejdede med at udvikle denne teknologi som en 3. generations transparent solcelleteknologi, hvor materialer som titandioxid og farvepigment imellem to ruder kan producere energi ved lyspåvirkning. Denne teknologi kan udvikles som micro-lameller, der er vinkelselektive, og derved bestemmer orientering for lysets transmitans gennem ruden. Da samarbejdet blev indledt, arbejdede PEC Group udelukkende med tekniske værdiparametre som solcelleteknologiens ydelse, holdbarhed og pris. Gennem samarbejdet med at integrere arkitektoniske og indeklimatiske parametre, er projektets fokus og titel ændret fra, at udvikle en teknologi til at udvikle en bygningskomponent, *"Fremtidens el-producerende solafskærmning"*. Solafskærmningen består af den vinkelselektive PEC celle, der er forsejlet mellem to lag glas, som en rude. Hensigten var, at studerende fra Arkitektskolerne skulle definere nye arkitektoniske potentialer fremkaldt af teknologien og at disse skulle integreres i udviklingsprogrammet for fremtidens PEC teknologi. Dette eksperiment kaldes derfor *"fra teknologi til energi producerende solafskærmning"*.

Hensigten med at introducere arkitektstuderende for PEC teknologi er, at skabe kompetencer og forståelse for, hvordan man ved at tilegne sig viden om en energiteknologi kan identificere arkitektoniske potentialer og integrere dem i udviklingen af teknologien frem mod energiproducerende bygningskomponenter.

Den metodiske udfordring er, at præsentere de studerende for de solcelletekniske aspekter, såvel som de indeklimatiske principper, på en måde, så de kan inddrage dem i deres kreative arbejde med at fremkalde arkitektoniske potentialer i den transparente energiproducerende rude.

De studerende skal opleve, at en tilgang til noget så høj teknologisk som ny solcelleteknologi, kan inddrages i design processen og fremkalde nye arkitektoniske potentialer. Det er også hensigten at demonstrere, at der findes vigtige udfordringer for arkitekten i at indgå produkt- og teknologiudviklingsteams på tværs af fag og kulturer generelt og specielt omkring udviklingen af nye bygningsintegrerede teknologier til produktion af vedvarende energi.

De fire workshops er derved i høj grad videns baserede, og de studerende har gennemført en proces, udviklet som en del af forskningsprojektet "*Transparente solceller – fremtidens el-producerende solafskærmning*". Formålet er at syntetisere de tekniske, funktionelle og æstetiske værdier til et arkitektonisk helhedsgreb, der fremkalder nye arkitektoniske potentialer i fremtidens transparente solceller. De studerendes resultater skal føde ind til forskningsprojektets del omkring at udvikle metode til at designe med teknisk viden samt ind til PEC Group, hvor de arkitektoniske potentialer indskrives i deres nye udviklingsprogrammer for PEC Teknologi. Derved er de fire workshops både forskningsbaseret undervisning samt undervisnings baseret forskning i såvel design metodisk som energi-teknisk regi.

Proces og metoder

1. Vision:

Visionen for eksperimentet er at udvikle nye arkitektoniske potentialer for vinkelselektive PEC solceller integreret i sydvendte glasfacader. De studerende har ikke udviklet individuelle visioner for deres projekter.

2. Criteria:

For en definition af solcellens multifunktionalitet som byggekomponent og ikke kun energi producerende teknologi, defineres 3 kriterier; teknik, funktion og æstetik. Indenfor hvert kriterium præsenteres de studerende for viden og en øvelse, der skal skabe en bedre forståelse for denne viden.

Criteria 1: "Teknik", den (energi) producerende solcelle

Viden: PEC, solcelle teknologi, forståelse for hvordan lyset absorberes i solcellen og transformerer det til elektricitet. Viden er givet gennem forelæsninger ved specialister fra PEC Group og solcellevirksomheden Gaia Solar

Øvelse 1: "Lys og energiproduktion". For at skabe en forståelse for teknologien bliver de studerende bedt om at bygge en model af en PEC solcelle, der forstørre den elektron vandring, der sker i solcellen til en model i ca. 1.000.000:1

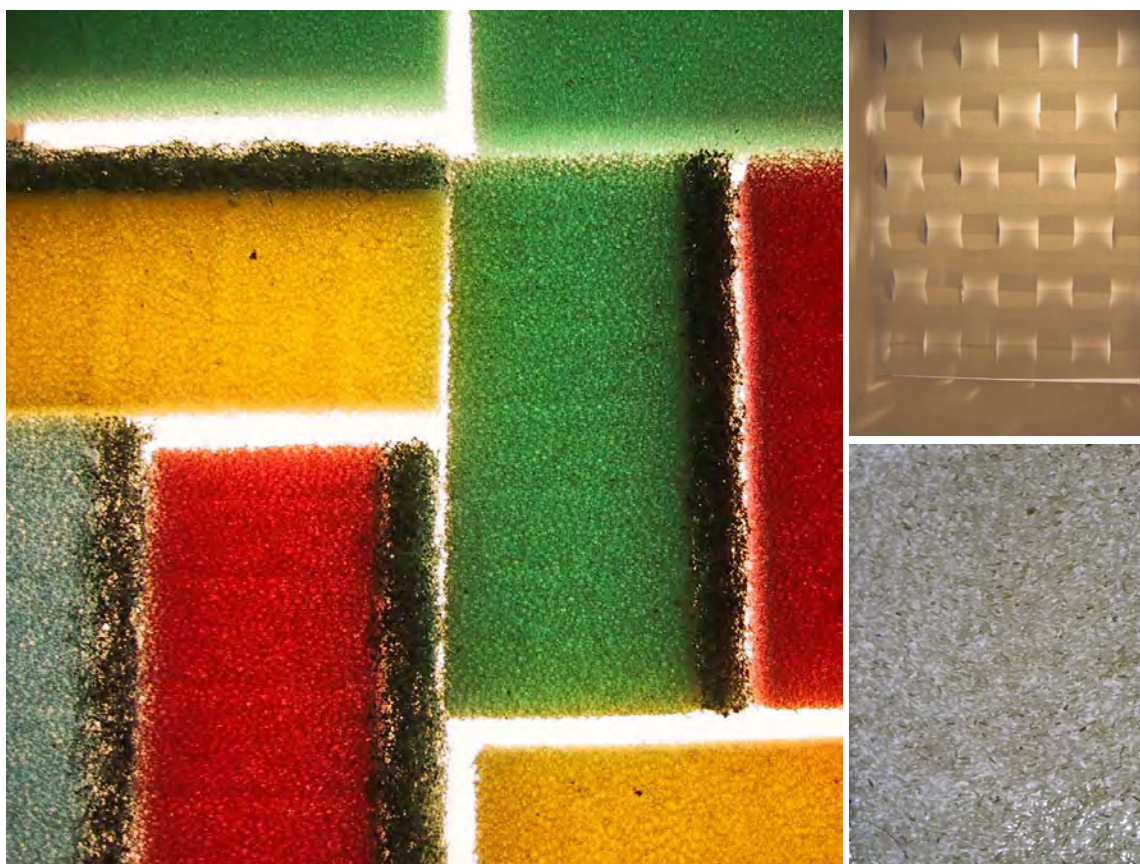
III. 3.2: Øvelse 1. Modeller der illustrerer princippet for PEC solcelle teknologi

Criteria og øvelse 1, 2 og 3



Øvelse 2: "Lys, materialer og udtryk". Forskellige materialer placeres i en rude, lys og skyggespil i materialet observeres og analyseres.

III. 3.3: Øvelse 2. Modeller, der udforsker samspillet mellem materialer, lys og skygge.



Criteria 2: "Æstetik", (materialer og stoflighed), den kommunikerende solcelle

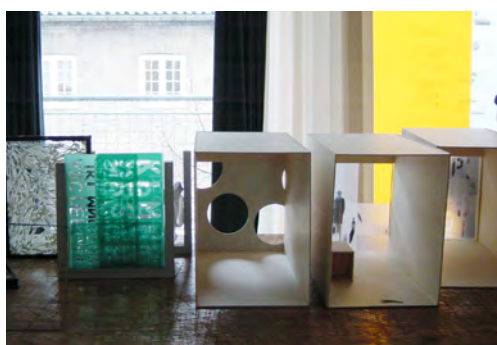
Viden: Teori om "Transparens", som fænomenologisk begreb om perception af lys i glas og rumligheder.

Criteria 3: "Funktion", (indeklima) den regulerende solcelle

Viden: Spektral selektivitet, transmission, refleksion og absorption af lys (og varme) gennem lukkede, åbne og transparente facadekompositioner ind i et rum.

Øvelse 3: "Lys, rum og indeklima". Et rum/kontor konstrueres, lyset guides gennem facaden komponeret af åbne, lukkede og transparente ruder og skaber variation og lys og skyggespil i materialet samt komfortabelt arbejdsbelysning. Skala 1:10

III. 3.4: Øvelse 3. Modeller, der illustrerer hvordan facadekompositioner med åbne, lukkede og transparente partier påvirker oplevelsen af rummet.



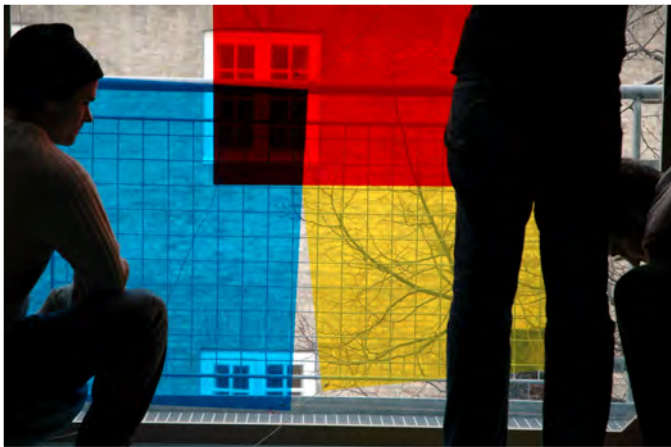
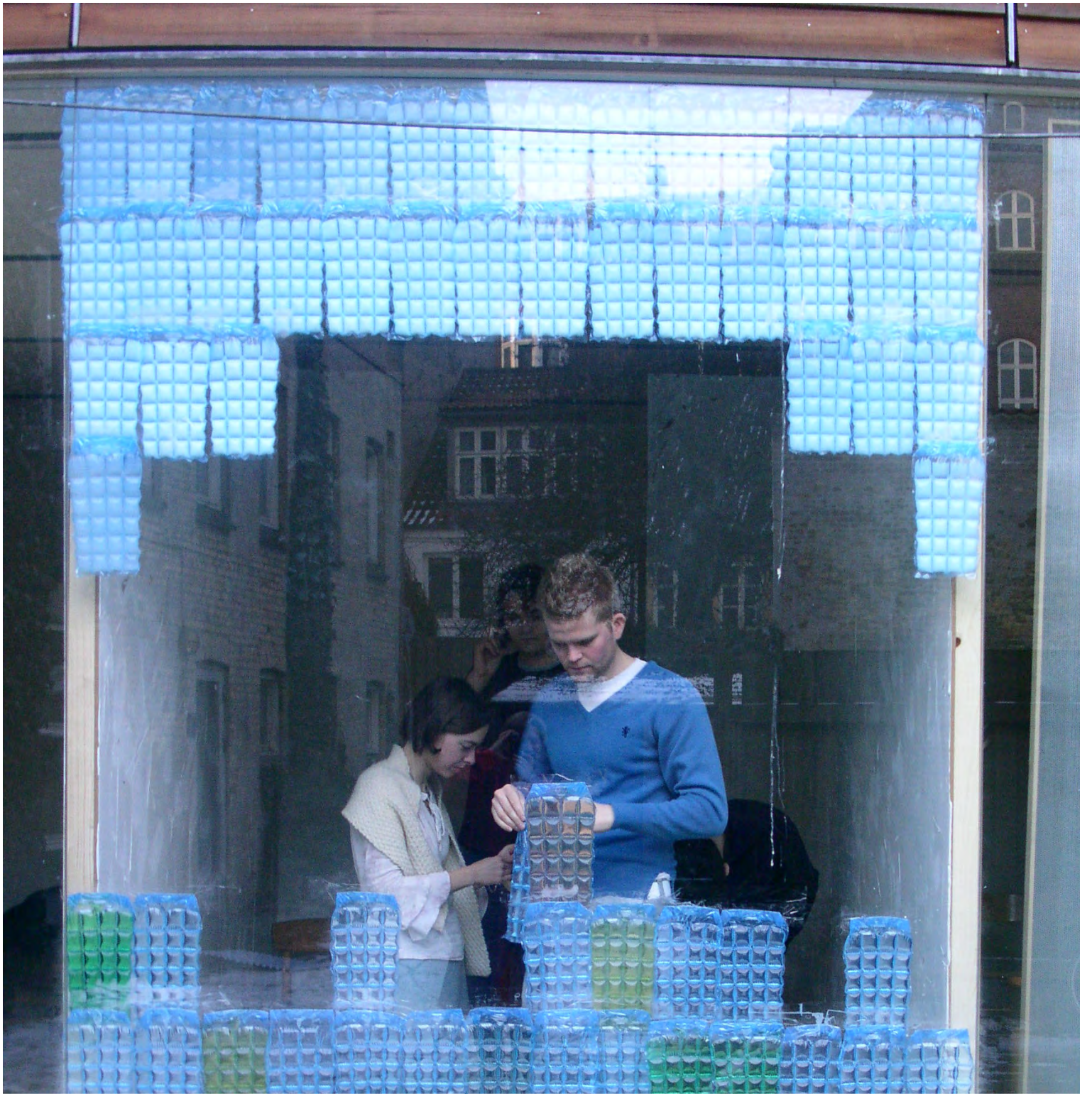
Der er ikke udarbejdet et program i projektførløbet. De studerende har arbejdet med de erkendelser og observationer de fik gennem deres øvelser og modelarbejde. Disse processer er beskrevet og deres valg er argumenteret gennem deres observationer, men ikke bundet op på et program og derved heller ikke reflekteret og verificeret i evalueringen og kommunikationen.

3. Construction

Rumstore modeller bygges op som mock-up i 1:1 med en sydvendt glasfacade. Denne glasfacade beklædes med materialer, der skal imitere solceller, der på én gang er regulerende, producerende og kommunikerende. Denne 1:1 model fungerer som "resultat" og præsenteres via en mundtlig gennemgang og en udstilling. Den skriftlige dokumentation er begrænset til hæfter, med relativt lidt tekst men rigt illustreret. Disse afleveres i forbindelse med præsentationen (Arkiv, 2).

III. 3.5: Mock-up 1:1





4. Evaluation

Der er ingen evaluering eller verificeret videns transformation af resultatet i forskningsmæssig forstand. Men der leveres en oversættelse af viden om solcelle teknisk, æstetik og indeklima til design parametre og en oversættelse af resultaterne foretaget af de tekniske partnere i forskningsprojektet gennem konstruktionen.

Begrebet transparens

Til beskrivelse af dagslystes æstetiske egenskaber igennem transparente facader introduceres i øvelse 2 begrebet transparens.

Transparens er som begreb op gennem det 20. århundrede blevet udviklet og benyttet til teoretisk at definere den moderne traditions fornemmelse for form og rum. Lyset er her en gennemgående parameter. Begrebet defineres i artiklen 'Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture' (Forty, 2000) indenfor tre betydningslag; bogstavelig transparens, meningstransparens og fænomenbundet transparens.

Fænomenbundet transparens blev defineret af Rowe og Slutzky i 'Transparency: Literal and Phenomenal' (Rowe, 1963). Transparens som begreb skulle beskrive det sansede, "atmosfæren". '...evnen til med øjet at gestalte realiteter, rum, der kan flyde over hinanden, hvis opmærksomheden ændres' (Rowe, 1963). Begrebet transparens benyttes her til en holistisk beskrivelse af transparente solceller med afsæt i en bogstavelig transparens, der dematerialiserer glasset og spiller på lethed og facadens gennemsigtighed (Thau, 2000). Meningstransparens, det 'gennemskuelige', belyser, at solcellen i glasfacaden kommunikerer om ligheden mellem energioverførslen af solens elektromagnetiske stråling i solcellen og lysten brydning gennem træernes blade, idet de kemiske processer i solcellen ligner fotosyntesen. Endelig fænomenbunden transparens, hvor solcellen beskrives gennem dens interaktion med glas og lys og hvordan den skaber 3D, oplevelser og æstetik.

For uddybning se "Den transparente energiproducerende glasfacade" [5]. Artiklen afsluttes med, at et af studenterprojekterne fra EX1, Januar kurset 2004, beskrives ved brug af begreberne fra transparens. Bogstavelig-, menings- og fænomenbunden transparens bruges således til at beskrive det rum der designes, derved bliver den kvalitative beskrivelse detaljeret og nuanceret, hvilket er eksemplificeret i nedenstående citat, der er et udsnit af beskrivelsen af studieprojektet indenfor fænomenbunden transparens:

"Solcellerne fremhæver det fænomen, at man kan fokusere på det nære, det fjerne eller spejlingerne i facaden, alternativt projicere lagene sammen til en ny visuel oplevelse. Her forstærker solcellerne den optiske oplevelse, idet der er tale om to spejlinger, glassets og solcellernes. Det ydre og det indre rum smelter sammen, og facaden får ud over de mange rumligheder den ekstra dimension, at man kan se rummet bagved, det nære rum, ruden (objektet) og det ydre rum. Samtidig kan man se udsnit af sig selv i såvel glassets som solcellens spejlinger. Facaden bliver herved middel til at afspejle omgivelserne/virkeligheden på en ny måde og skabe nye 3-dimensionale rumligheder." [5]

Viden og kreativitet udviklet i processen

Hvordan kan viden om lys fra forskellige discipliner understøtte en kreativ proces?

Det er oplevelsen, at de studerende får en god forståelse for lysets rolle indenfor nye tekniske fagområder og inspireres til at integrere disse elementer i facaden og derved generere nye formsprog. Det fremgår bl.a. af rapporten fra det første kursus: *"Transparente facader - Solceller materialitet og modeller, 5.-23. januar 2004"*. (Arkiv 2) En gruppe studerende har her beskrevet deres proces gennem de tre øvelser frem til mock-up'en. Deres beskrivelser bliver fortællende omkring deres erkendelser i processen. Eksempelvis beskriver en gruppe om opgave 1:

"Vi byggede en model op, som viste de grundlæggende principper i elektronens vandring mellem det aktive farvestof i cellen, titandioxiden og sidst gennem elektrolytten som ion. Modellen viser, hvordan solens stråler rammer den røde farve, der dækker titandioxiden..... (vores model burde i virkeligheden have vist, hvordan oxiden fungerer som halvleder og derfor leder strømmen i den same retning - her ser det ud som om....". (Arkiv 2, Gruppe 2 opgave 1)

Citatet er valgt til at illustrere, at de studerende får en helt enkel og legende tilgang til en ellers fremmed teknologi og hvordan modellen giver dem en tryk måde at oversætte den tekniske viden til en et kendt sprog.

Ved workshoppen på Kunstakademiets Arkitektskole valgte flere grupper at pege på objekter fra hverdagen, der beskriver processen i solcelleteknologi, som flippermaskinen, hvor kuglen symboliserer elektronen, der slås løs ved energipåvirkning (fjederen i flippermaskinen og solen i PV teknologien) og kastes rundt, men ender samme sted inden den igen bliver sendt af sted ved energipåvirkning. Et andet billede på solcelleteknologien er englespillet, hvor varmen fra lyset frigiver energi, der får spillet til at dreje rundt og derved spilles musik - varmen transmitteres til lyd, mod elektricitet i solcellen.

I øvelse 2 undersøger samme gruppe fra Januar 2004 forskellige materialer i en termorude ud fra form- og lysgenererende observationer. Gruppen ender med fem forskellige modeller med fortolkninger af membranen. De studerende skriver:

"...Det viste sig, at den brydning og refleksion (af lyset), der sker i netop de vandfyldte balloner og isternings poserne gav ret spændende lysmæssige resultater, når man satte det ind i en lille prøvemodel". I øvelse 3: "Vi arbejdede videre med tanken om bevægelige membraner...Tanken var at opbygge et system af fleksible membraner, som kunne strækkes ud og derved ændre transparens (også på baggrund af erfaringerne med ballonerne i øvelse 2)" "...Derfor tog vi udgangspunkt i ideen fra Øvelse 2, hvor ruden består af en mængde små celler med mulighed for at variere transparens og translucens fra celle til celle. Vi eksperimenterede...i 1:10 og kom frem til, at de forskellige farver og grader af gennemsigtighed skulle anvendes meget kontrolleret for at give den ønskede effekt (behageligt arbejdslys - afskærmning mod indblik, mulighed for at se ud, integration af solcelleteknologi i facaden)...Vores plan for facaden blev derfor opbygget i tre forskellige zoner....Ret konkret illustrerede vi denne ide med væskefyldte

celler (isternings poser)....Disse poser fyldtes med forskellige væsker for at opnå den ønskede gennemsigtighed og farve og samtidig være klimaregulerende. Vi tænkte os solcelleteknologien integreret i disse celler således, at PEC-cellen findes i det yderste lag glas...." (Arkiv 2, Gruppe 2 øvelse 2)

Det fremgår af citaterne, at de studerende arbejder med en additiv erkendelse i den rækkefølge de laver deres øvelser og modeller. Der er i øvelserne en naturlig progression gennem den skallering der sker i øvelserne, de arbejder lineært og går ikke tilbage i processen. Og ikke mindst fremgår det at de studerende har opdaget hvor effektivt det er at modulere med lyset via materialerne.

III. 3.6: Modeller af solcellekomponenter formet frit med afsæt i PEC cellens grundbestanddele, det røde farvepigment og de elektriske ledere. 1/2 eller 1 side



III. 3.7: En gruppe oversætter solcelle teknologien til 'blade' der fungerer som touch pads, der kan flyttes ved berøring, en teknologi der ved præsentationen i 2004 virkede meget abstrakt, men i dag kendes fra vores hverdag med smart phones og tablets. ½ eller 1 side



De studerende får mange visuelle erkendelser omkring lys, teknologi, materialitet, indeklima og rum gennem deres øvelser. De når frem til designs af transparente facader med en æstetisk og teknisk indlevelse og syntese, de ikke ville kunne designe uden den forudgående videns tilførsel og undersøgelser af teknologi, rum og indeklima eller gennem observationer af lys og materialer i modellerne.

Hvilken ny viden genereres i eksperimentet?

Mock-ups opleves, fotoregistreres, præsenteres og diskuteres ivrigt i processen og ved de afsluttende gennemgange. Disse udgør derved et godt fundament for erkendelser og diskussioner blandt de studerende i undervisningssituationen samt for projektparterne, der deltog i disse diskussioner og præsentationer. Mock-ups understøttes af korte beskrivelser af processen, de tre øvelser samt deres modeller.

Der udvikles ikke kriterier for evaluering, der undervises i metoder til måling af lys, beregning af energiproduktion, animering af lysets påvirkning af rummet men ikke systematiseret ud fra at definere kvantitative evalueringens kriterier. Projekterne kommunikeres eksternt gennem udstillinger på skolerne, rapporter og ved en international konference om solenergi, der afholdes ved afslutning af den sidste workshop. Men der foretages ikke forskningsbaserede konklusioner, hvilket ligger i tråd med at opgaven er stillet for at skabe diskussion og pege på potentialer i at integrere arkitektoniske værdikriterier i udviklingsprogrammet for fremtidens transparente solceller. Resultaterne forbliver på demonstrationsniveau, hvor det primært er modellerne, der taler.

Der opleves et stærkt engagement og en begejstring hos de studerende, hvilket tolkes som effekten af, at de studerende i processen får flere gode erkendelser og ser potentialer gennem ny viden, der transformeres gennem øvelser og konstruktioner til arkitektoniske potentialer. Derudover er det en motivationsfaktor, at de studerendes arbejde føder ind til forskningsprojekter i et større regi og derved har en betydning i den sammenhæng. I det forskningsprojektet er meget afhængig af de studerendes projekter, oplever de studerende, at der lægges mange ressourcer i at informere og vejlede de dem.

III. 3.8: Gruppernes arbejde, de tre steps og deres endelige model, og hvordan teknologien

har haft indflydelse på deres design. 1 side,



De studerende konkluderer ikke på deres observationer og deres beskrivelser af hvordan de kommer til deres i processen er ikke forsknings baserede. Derfor bliver det svært at evaluere mock-up i en generel forstand.

Viden forbliver tavs ud over den kommunikation og motiverende effekt modellerne har i

sig selv (showroom, jf. beskrivelse i Kapitel 4) og ud over den *story telling*, der findes i at beskrive projekterne som oplevede.

Eksperimentet kunne være udbygget ved at de studerende skulle oversætte de arkitektoniske potentialer fremkaldt i modellerne til faktiske værdikriterier, der kunne integreres i udviklingsprogrammet for fremtidens PEC solcelle.

De studerendes projekt fortolkes i projektgruppen i forhold til hvordan de kan relateres til forskningsprojektet om udviklingen af ny teknologi. F.eks. bliver projektet fra Gruppe 2 evalueret indenfor de tre kriterier:

Den producerende solcelle

"Solceller der kan indgå i denne sammenhæng findes ikke på markedet i dag....Den ønskede celle kan eventuelt realiseres som en videreudvikling af en polymerbaseret PEC celle...men tids-horizonten i den udvikling er højest usikker....Et alternativ til den polymerbaserede PEC celle er de organiske solceller...Denne celle vil utvivlsomt honorere kravet om fleksibilitet på samme måde som PEC cellen...en facadeenhed på 5 m² kan producere 120 kWh per år...Den foreslåede facade giver en spændende vision om integration af solceller i fremtidens facader.

Den regulerende solcelle

Termisk set er løsningen interessant...stærkt afhængig af, om det er muligt at cirkulere væsken i elementet...Hvis det er muligt at cirkulere væsken, skal elementet placeres på inder-siden af facadens varmeisolerende del. Den del af solens varme, der absorberes i elementet, kan transporteres væk ved at cirkulere væsken....Om vinteren kan evt. kuldenedfald hindres ved at lede væske med en lille overtemperatur i forhold til rumtemperaturen...

Dagslysindtag. Der er i opgaven ikke taget højde for at løse problemet med at afskærme for det direkte sollys og transmittere det høje himmellys. Modellen, som den fremstår skærmer ikke for hverken det direkte lys eller sollyset, men integrering af elektrokrom teknologi vil kunne begrænse kvantiteten af lysindtag...Hver 'isterning'/celle fungerer som en kameralinse, der som en vid-vinkel vender billedet (camera obscura). Det direkte sollys vil derfor tegnes nederst på cellen...de mange linser fungerer som enkelte lyskilder, der spejler lyset i rummet. Dette spredte lys giver en blød skygge, hvilket tegner en fantastisk stoflighed. Samtidig vil lyset, da det kommer fra samme side have en præcis retning. Sollyst vil spredes i hele rummet, hvilket vil formindske blænding. Ser man ud på solen vil den fremstå som mange sole, en i hver celle, hvilket også vil mindske blænding.

Den kommunikerende solcelle

Bogstavelig transparens

Facadens horisontale tredeling fremstår fornuftig med hensyn til lysregulering og rumlig komposition. Dog kræves det, at den midterste del bliver mere transparent, ved at fjerne væsken i cellen eller fylde cellen, så den spænder helt ud mellem glasset...

Meningstranparens

Forslaget er det mest tekniske af de tre løsninger, idet facaden indeholder PEC celler, der farver lyset, en elektrokrom teknologi bygget på 'liquid crystals' som regulerer lysindfald og endelig en væske, der afkøler facaden. For en gennemsigelighed af teknikken i facaden er det slørende at der er tre teknikker...

Fænomenbunden transparens

...den realiserede model med isternings poser giver nogle helt nye billeder og perspektiver på hvordan især lysindtaget kan give helt nye potentialer. Facaden vil såvel indefra som udefra kunne fremstå smuk, tegnet af de små celler som ornamenteringer, næsten som organiske strukturer. Om aftenen vil facaden fremstå som et lysende element, der vil oplyse byens rum, og indirekte oplyse arbejdsrummet...I hver celle tegnes omgivelserne på hovedet, himmelen er derfor nederst i cellen. Lys-spillet og den perceptionelle oplevelse af de mange små billeder giver en smuk malerisk struktur, tegnet af omgivelsernes farver og lys. Der er stor forskel på oplevelsen af cellerne tæt på.." (Arkiv 3)

Det fremgår af ovenstående, at der kan foretages en viden overførsel af de erkendelser der er sket gennem design processen til de tekniske miljøer.

I slutrapporten, formulerer Teknologisk Institut til Energistyrelsen resultatet således:

"De arkitektoniske studier af transparente facader med integrerede solceller viser at "en leg" med solceller og mønstring, åbner for en verden af muligheder og potentielle løsninger på glasfacadens termiske problem - løsninger som ikke er begrænset til en mønstring på mikroskopisk skala....Der ligger mange uudforskede potentialer i at integrere transparente solceller i byggeriet. En af de primære opgaver er, med afsæt i erfaringerne fra dette projekt, at sammenkøre de arkitektoniske værdier som dagslysfald og æstetisk udtryk med undersøgelserne af solcellernes påvirkning af det termiske indeklima. Der ligger stor udfordring i at udvikle og tilegne arbejdsmetoder der integrerer undersøgelserne via det termiske bygnings simuleringsprogram med de fysiske modelforsøg...I det videre arbejde bør der fokuseres på et dybere studie af lysforholdene i lokalet bag facaden, en vurdering af facadens æstetik også set udefra, samt simuleringer der illustrerer hvordan forskellige makroskopiske mønstringer påvirker det termiske indeklima. (Arkiv 1)

Konklusionen i slutrapporten er oplevet og ikke evaluerede resultater, men det vurderes, at være en god inspiration, til at fortsætte arbejdet med at integrere tekniske problemstillinger i arkitektoniske øvelser og omvendt. Denne del af slutrapporten indeholder ikke konkrete facts og konklusioner.

Resume og model

EX1 viser, at viden om lys er tilført projektet og oversat til design kriterier indenfor såvel solcelle teknologi som indeklima og æstetik, hvilket har understøttet den kreative proces ved at motivere til at skabe nye arkitektoniske potentialer i transparente solceller.

I forhold til Schöns tre definitioner af eksperimenter beskrevet af Hansen m.fl. (2003) jf. Kapitel 2, er dette eksperiment defineret som *the explorative experiment*, idet eksperimentet udføres uden klart definerede visioner, hypoteser. Derimod er forventninger eller formodninger baseret på fornuft og intuition, hvor målet er at skabe opmærksomhed. Ifølge Schön er viden fra det *explorative experiment* ofte tavs. Produktionen af ny viden er derfor også begrænset til den erkendelse, der opstår ved oplevelse af mock-up'en.

Der er ingen evaluering eller forsknings baseret videns transformation af resultatet i viden-

skabelig forstand. Men der foretages en oversættelse af viden om solcelle teknik, æstetik og indeklima til design parametre samt en oversættelse af designet til kriterier for udviklingsprogrammet for fremtidens solceller, foretaget af de tekniske partnere i forskningsprojektet.

Det er designeren, der oversætter den viden, som bliver givet fra andre fageksperter, og der er kun fokus på at frembringe nye arkitektoniske potentialer, der kan kommunikeres tilbage til de tekniske udviklingsmiljøer. Samarbejdsformen betegnes som *cross-disciplinary*, der ifølge Kofoed (2013) defineres af Meeth som studier, hvor en faglighed er betragtet fra en anden faglighed, jf. Kapitel 2. Der er ikke tale om, at de forskellige fagligheder mødes og syntetiserer deres faglighed i processen, som vil blive beskrevet i de følgende eksperimenter. På trods af det er den viden der udvikles i EX1 anvendelig for projektets tekniske partnere, og den integreres i deres fortsatte arbejde.

Integration af en teknisk kompleksitet som PEC teknologi i de kunstneriske uddannelser var på daværende tidspunkt ikke almindeligt, men blev oplevet som frugtbar for de studerendes forståelse for potentialerne i at arbejde med tekniske aspekter. Ikke som begrænsninger, men som nye potentialer. Ligeledes understreger slutrapporten for forskningsprojektet, at den kunstneriske tilgang tilført forskningsprojektet gennem samarbejde med Arkitektskolen har tilført projektet en ekstra dimension, som har ført til nye projekter, hvor denne type samarbejde på tværs af tekniske udviklingsmiljøer og kunstneriske uddannelser udvikles, hvilket forskningsprojektet bag EX2 er et resultat af.

Processen er illustreret i nedenstående model, hvor viden fra forskellige fag introduceres indenfor de tre kriterier. De tre øvelser gennemføres indenfor hvert kriterium som en lineær proces og denne viden syntetiseres i konstruktionen, mock-up'en. Her er der ikke fokus på de tre kriterier. Konstruktionen illustrerer de oplevede potentialer og bidrager med disse til det tekniske udviklingsmiljø gennem abstrakte ideer og billeder på nye arkitektoniske potentialer i PEC teknologi.

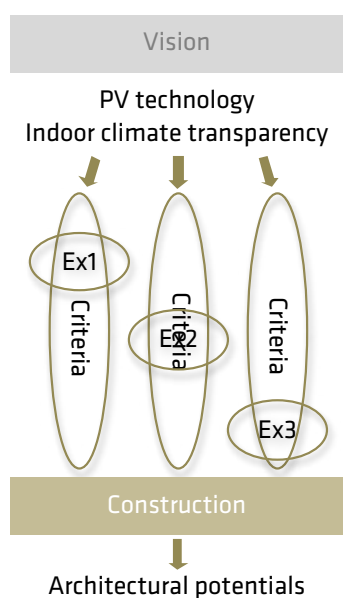


Fig. 3.1: Proces Model

EKSPERIMENT 2

Fra regulerende component til producerende rum

Strategier for værdisætning af eksisterende transparente solcellekomponenter i en serie eksperimenter i 1:1.

Komponenterne blev undersøgt i kompositioner med lys og rum for at fremkalde og kommunikere deres flerfunktionelle værdier igennem et holistisk produkt katalog, hvilket er formuleret i Slutrapporten:

“The overall purpose with the project “LIGHT AND ENERGY – solar cells in transparent facades” is to demonstrate and disseminate the potentials for the application of light-filtering solar cells as multi-functional components, which meets the architectural objectives while contributing to a good indoor climate, a suitable quality of lighting indoor and at the same time produces electricity” (Hansen, 2006)

Projektpartnere og viden:

Arkitektskolen Aarhus: arkitektonisk komposition og sammenstilling af værdier, udvikling af metoder til definition af kvalitative værdier og sammenstilling af værdier på tværs af fag.

Teknologisk Institut, PEC Group: PEC solcelle teknologi, energiproduktion, indeklima, varme-transmittans.

VELFAC A/S: produktudvikling og markedspotentiale.

Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm; målinger af lystransmittans og transparens gennem komponenterne, herunder vide om facaden som klimaskærm.

Projektet er beskrevet i detaljer i slutrapporten til Energistyrelsen: “Slutrapport for PSO F&U projekt nr. 2006-1-6302, LYS OG ENERGI – solceller i transparente facader, 2006” (Hansen, 2006) (Arkiv7). Samt i “LYS ENERGI OG ARKITEKTUR”. Denne indeholder blandt andet de fire artikler [5], [6] og [7], hele publikationen findes i (Arkiv 8).

Forskningsprojekt “LYS & ENERGI solceller i transparente facader” er finansieret af Energinet.dk. På Arkitektskolen Aarhus er hensigten med projektet, at styrke de studerendes forståelse og færdigheder i at integrere tekniske, herunder energi-tekniske teknologier i byggeriet gennem en proces, hvor de fremkalder nye arkitektoniske potentialer. I forskningsregi var hensigten, gennem udvikling af metoder til kvalitativ vurdering og sammenstilling af viden på tværs af fag, at skabe viden om hvordan byggekomponenter kan defineres og beskrives med både kvalitative og kvantitative værdier. Formålet var, at illustrere hvordan vurdering og beskrivelse af nye komponenter rykker fokus fra det fysiske produkt, til at beskrive hvordan produktet påvirker brugeren i en arkitektonisk kontekst.

“En grundlæggende udfordring i frembringelsen af arkitektur er fornemmelsen for, hvordan de enkelte byggekomponenter præsenterer sig i deres omgivelser som en del af en helhed – en del af en rumlig komposition såvel som en del af facaden. Ved udvikling og bygningsintegration af nye energiteknologier er udfordringen ekstra stor. Disse teknologier bliver ofte udviklet og vurderet som monofunktionelle lag, og ikke som komponenter, der skal fremtræde i en arkitektonisk sammenhæng” [6, p.10]

Workshoppen var et led i arkitektskolens politik om at integrere forskning i undervisning og undervisning i forskning.

På daværende tidspunkt var udviklingen af tyndfilmsolcelle teknologier så langt fremme, at det var muligt at kortlægge det internationale kommercielle marked og analysere og sammenstille de mest aktuelle lysfiltrerende tyndfilmteknologier. Derved defineres disse solcellernes tekniske og arkitektoniske potentialer i et langt mere holistisk perspektiv end de traditionelle produktpræsentationer, der typisk har fokus på kvantitative værdier som ydelse og pris.

I projektet er der udvalgt og undersøgt 6 kommercielle transparente solcellekomponenter for at generere viden om, hvordan lysfiltrerende solcellekomponenter kan anvendes i arkitekturen samt for at komme nærmere en metode, der kan definere deres værdier i et arkitektonisk objektiv. Komponenterne er værdisat i tværfagligt regi af forskningsprojektets parter og består af både beregninger, målinger og registreringer. For en karakterisering af komponenten er tekniske undersøgelser af komponenterne benyttet. LT-værdi (lys transmittans), g-værdi (solenergi transmittans) og åbningsgrad for panelerne er målt og beregnet på Danmarks Tekniske Universitet. Belysningsstryke, luminans og udsyn er målt og registreret på SBI. Forventet årlig strømproduktion under danske forhold er beregnet på Teknologisk Institut. [6]

Endelig er de oplevede karakteriseringer af solcelle komponenten, facaden og rummet defineret på workshoppen ”LYS+ENERGI+ARKITEKTUR” afholdt over 3 uger på Arkitektskolen Aarhus med 40 internationale arkitektstuderende på kandidatniveau. Det er metoderne udviklet til denne workshop, selve workshoppen og bearbejdning og kommunikation af resultaterne, der udgør eksperimentet EX3 i denne afhandling.

I EX3 undersøges, hvordan dagslyset kan komme i spil som multidimensionelt design element, ved at studere hvordan lysfiltrerende, transparente solcellekomponenter, ud over at producere energi (ved at omdanne solens varme til elektricitet) og regulere indeklima (via varme-transmittans gennem ruden), kan bidrage i en æstetisk, arkitektonisk sammenhæng.

Proces og metoder

1. Vision

Den overordnede vision er at vise, at nye energiteknologier kan fremkalde nye arkitektoniske potentialer ved at fokusere på lysets muligheder for at skabe effekter i de transparente solcellekomponenter. Der er ikke i projektgrupperne defineret en vision for de individuelle projekter.

2. Criteria,

I projektet er kriterierne *regulerende*, *kommunikerende* og *producerende* defineret med det formål, at bestemme og sammenstille de tværfaglige værdier der knyttes til den transparente solcelle komponent.

De tre kriterier, defineret i projektet, skal fremkalde og kommunikere værdier i de transparente solcellekomponenter, der er både *regulerende*, *kommunikerende* og *producerende*. I disse eksperimenter er værdikriterierne defineret med reference til Selmer (2003). I artiklen "Facadens Lagdeling" beskriver Selmer facaden som, i biologisk/fysisk forstand, *regulerende* og facaden opfattet i semiologisk forstand som *kommunikerende*.

De *regulerende værdier* bygger på naturvidenskabelige love for, hvordan mennesket i samspil med naturen kan regulere indeklimaet, hvor facaden er en formidling af strømme af stof og energi. En naturvidenskabelig kvantitativ tilgang. Selmer (2003) taler om den regulerende façade som en slags hud, der består af forskellige specialiserede funktioner, der kan reguleres.

De regulerende værdier bestemmes i EX2 gennem målinger og beregninger til kvantificering af lysets fysiske møde med komponenten, facaden og rummet. Således er der i projektet gennem laboratorieforsøg målt hvor meget dagslys der transmitteres ud gennem ruden (LT-værdi) samt hvor meget varme der transmitteres ind gennem ruden (g-værdi). Ligeledes er varmetransmittans ud gennem ruden (U-værdi) målt og beregnet. Endelig er der udarbejdet en energiberegning, der definerer det samlede brutto energiforbrug, dvs. både produktion og forbrug. [6]

De *kommunikerende værdier* omhandler ifølge Selmer (2003, p..) en menneske til menneske relation, hvor facaden informerer og giver mulighed for betydningsudveksling. Dette tager, ifølge Selmer, afsæt i selve stoffet og principper for dets sammenføring, som ved tavs tilstedeværelse appellerer til umiddelbare sanseoplevelser. Her gives facaden et særligt udtryk. Det bundne ornament. En forankring i det naturgivnes umiddelbare sanselighed. Det nærværende. (Selmer 2003)

I EX2 er det glassets tekstur og solcellernes ornamentering, der udgør det bundne ornament. Dette iscenesættes, så der opstår forskellige udtryk afhængigt af lysets refleksioner, absorptioner og transmissioner i komponenten. [5]

I projektet lægges et ekstra lag på, facadens indvirkning på mennesket i fysiologisk og psykologisk forstand, de *producerende værdier*. De producerende værdier beskriver facaden, ikke gennem et udtryk som den kommunikerende, men i forhold til hvilket indtryk facaden har på mennesket. Hvilke følelser der produceres i mennesket, ved den påvirkning der sker i mødet med facaden og her også komponenten og rummet. Hvor den kommunikerende facade kan siges at have en effekt, har den producerende facade en affekt. De *producerende værdier* karakteriseres, ud over den strøm solcellen producerer, hvordan komponenten, facaden og rummet påvirker individet. I dette projekt defineres, hvilke indtryk omgivelserne har på individet skabt via de transparente solceller, der kan transmittere sollys ind i rummet.

Såvel sollyset som mørket har stor indflydelse på menneskets velvære, trivsel og sundhed. Definitionen af det producerende rum refererer til atmosfærebegrebet, til beskrivelse af den vekselvirkning, der opstår mellem subjekt og objekt og beskrivelse af, hvordan solcellekomponenten kan præge oplevelsen af rummet. [6]

Der er i EX2 udviklet øvelser og metoder til hvordan de kvalitative, kommunikerende værdier bliver afsøgt og kommunikeret gennem tre indledende øvelser, hvor kommunikerende værdier for hhv. komponenten, facaden og rummet bliver udviklet.

I tre indledende øvelser udvikler de studerende metoder til analyser og oplevelse af de æstetiske potentialer gennem modeller, begreber, fotos og animationer. Herved opstår en forståelse for en ny byggekomponent og dens muligheder for at iscenesætte lys og skygger i facadekomposition og i rumlig sammenhæng.

I øvelse 1 bliver de transparente tyndfilmkomponenter iscenesat under forskellige lysretninger og lysstyrker samt analyseret for de udtryk, der opstår gennem lys og skyggespil, spejlinger, ornamentik, transparens og farver etc. Dette sammenfattes i 5 begreber samt fotos af lysets samspil med komponenten.

I øvelse 2 gennemføres undersøgelser med kompositionen af lukkede, åbne og transparente facadeelementer, der afsøger solcellepanelernes muligheder i forskellig skala (component, façade og rum).

I øvelse 3 bliver facader af eksisterende bygninger, ved simulering, applikeret de nye energiproducerende byggekomponenter. Digitale collager og fysiske modeller med solcellepanelerne belyser nye muligheder for at integrere komponenterne i det offentlige rum.

3. Construction

I EX2 er de producerende værdier observeret med kroppen, ved at være i rummet, betragte facaden og komponenten. Derfor konstrueres i workshoppen rumstore modeller, som de studerende kan undersøge ved at være i dem, opleve dem med kroppen som instrument. Det skaber også mulighed for at invitere andre ind, og afsøge og diskutere deres oplevelse af at være i rummet. Denne del dokumenteres gennem billeder og ord.

4. Evaluation

Der er ikke udarbejdet egentlige brugerundersøgelser med kvalitative metoder som spørgeskemaer eller interviews, og der er ikke opsat forsknings relaterede evaluerings kriterier, som kan testes efterfølgende.

Modellerne består af en ramme konstruktion på hjul, indenfor hvilken de rumlige konstruktioner udfolder sig. Gennem installationer i disse mobile rammekonstruktioner fremhæver de studerende særlige æstetiske aspekter af de transparente tyndfilmsolcellepaneler i et skalaløst, men tilgængeligt og mobilt rum. Rummodellerne bliver senere vurderet af en tværfaglig ekspertgruppe og præsenteret for et internationalt publikum ved en åben udstilling, ligesom de er kommunikeret gennem et holistiske produktkatalog "LYS+ENERGI+ARKITEKTUR" (Hansen, 2008) (Arkiv8), hvori artiklerne [5], [6] og [7] indgår.

I dette eksperiment er programmet vægtet og lagt ind som en aflevering, hvor de studerende skal argumentere for deres erkendelser gennem øvelser og hvordan dette afspejles i et program for iscenesættelse af komponent i model.

III. 3.9: Opbygning af mock-up's til rumstore eksperimenter



Matrix til sammenstilling af værdier

Til sammenstilling af de tre kriterier og de tre forskellige genstandsfelter udvikles en matrix, der skal demonstrere, hvordan værdier på tværs af skala og fag kan sammenstilles.

“Målet er at få de tekniske og specialiserede lag udviklet til multifunktionelle lag i facaden. Lag der tilfører flere betydninger end blot at fungere som bygningens energieffektive hud. Problemet er, at det er vanskeligt at kommunikere, og svært at opnå den ønskede synergi, når de tværfaglige værdier skal sammenstilles og vægtes overfor hinanden. Ofte resulterer dette i at de tekniske værdier, som nemt kan defineres og måles, bliver udgangspunkt for værdisætningerne for komponenterne, mens de æstetiske værdier ikke integreres tilstrækkeligt. Derfor er der udviklet en matrix, der skal sammenstille det målte, beregnede og oplevede. Den er tænkt som et redskab til i processen, at stille og besvare de rigtige spørgsmål for en mere holistisk vurdering. Samtidig skal den fungere som kommunikationsmiddel, hvor forskningsprojektets resultater kan systematiseres og syntetiseres, og derved på overskuelig vis beskrive hver solcellekomponent i et tværfagligt perspektiv.” [6, p.10]

De tre genstandsfelter beskrives som: “Komponenten”; det enkelte element, der udgør et led i flere samvirkende elementer, som tilsammen udgør facaden. “Facaden”; en bygningsfor side, det repræsentative og skærmende, bygningens beklædning, bygningens ydre der formidler overgangen mellem inde og ude og endelig “Rummet”; det tredimensionelle rum, der opstår bag facaden, bygningen indre.

III. 3.10: Martix for kommunikation af komponentens værdier i holistisk regi.

De tre værdikriterier, regulerende, kommunikerende og producerende på den horisontale akse og de tre skala, komponent, facade og rum på den vertikale akse. [6]

	Regulerende	Kommunikerende	Kommunikerende
Komponent	Hvordan regulerende komponenten? - Lys - Varme - Udsyn	Hvad kommunikerer komponenten? - Udtryk - Lys og skyggespil	Hvilke værdier producerer komponenten? - Elektricitet - Indtryk
Facade	Hvordan regulerer facaden? - Facadeopbygning - Lys - Varme - Udsyn	Hvad kommunikerer facaden? - Udtryk - Lys og skyggespil - Komposition af det åbne og det lukkede filteret	Hvilke værdier producerer facaden? - Elektricitet - Indtryk
Rum	Hvordan reguleres rummet? - Lys - Varme - Udsyn	Hvad kommunikerer rummet? - Udtryk - Lys og skyggespil	Hvilke værdier producerer rummet? - Indtryk

"I dialogen fra venstre øverste hjørne (den regulerende komponent) til højre nederste hjørne (det producerende rum) ligger spændet mellem den fysiske (lys- og klimaregulerende) vurdering af den fysiske komponent til vurderingen af, hvad rummet producerer i mennesket, altså hvordan rummet påvirker mennesket. Fra den fysiske component, hvor effekten defineres, som er den traditionelle værdisætning, til hvilket indtryk komponenten har på individet, her defineres affekten. Sidstnævnte bør være en væsentlig værdiparameter, men forbigås ofte, idet den kan være vanskelig at definere." [6, p.12]

For mere detaljeret beskrivelse se: "Matrix, metode til karakterisering", [6]

De studerende afleverer deres projekter i form af foldere, der er disponeret efter regulerende, kommunikerende og producerende, komponent, facade og rum. Gennemgange af deres projekter foregår efter denne disponering. Endeligt udarbejdes et katalog, hvor alle værdiparametrene for alle seks paneler præsenteres i samme type matrix. Jf. (Arkiv8, s.30-63). Her sammenfattes undersøgelserne af de 6 transparente solcellekomponenter, ved at indskrive deres værdier i de 9 felter i den dertil udviklede matrix. Der udarbejdes to matrix for hvert komponent. Én med skrift og tal i de 9 felter og én hvor felternes værdier udtrykkes gennem billeder. Værdierne er defineret i tværfagligt regi af forskningsprojektets parter og består af både beregninger, målinger og registreringer.

Ill. 3.11: Produktkatalog. Solcellekomponent præsenteret i to matrix, én med illustrationer og én med tekst og tal.

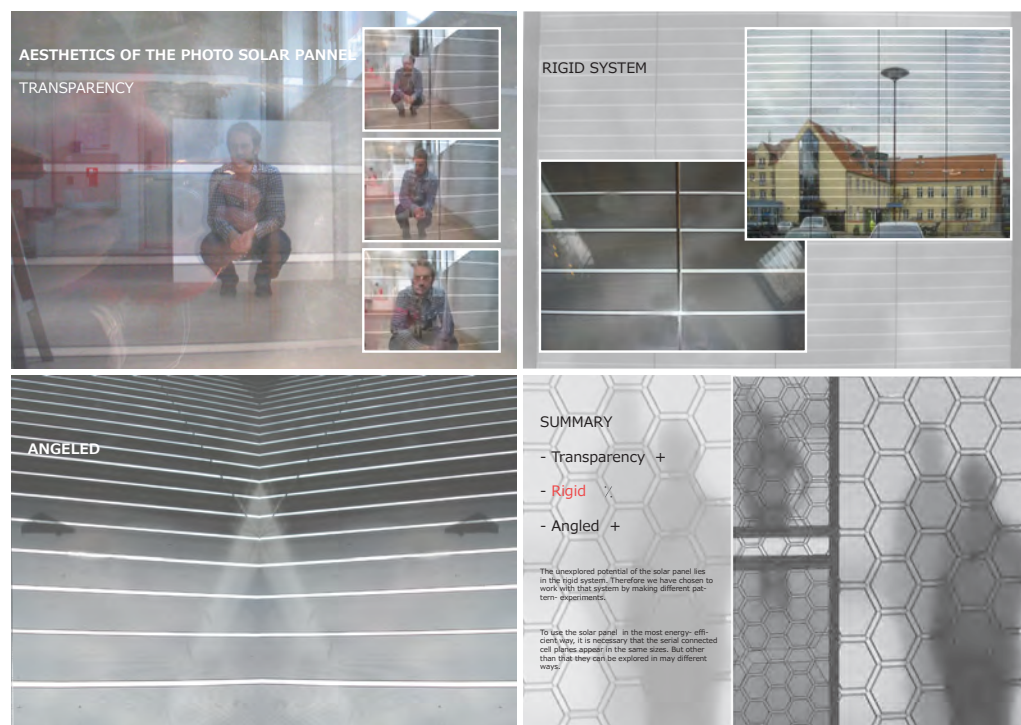
Viden og kreativitet udviklet i processen

Hvordan kan viden om lys fra forskellige discipliner motivere en kreativ proces?

Til illustration af de studerendes feed back på metode og teknisk input belyses her arbejdet i Gruppe 5. I øvelse 1 definerer gruppen fem begreber (transparens, reflection, translucent, patterning, layering). Disse begreber belyser de emner de studerende finder interessante i indkredsning af solcellekomponentens kommunikerende udtryk ved forskellig lyspåvirkning og anden iscenesættelse. Til de fem begreber udvikler de studerende i alt 27 fotos til belysning af de effekter der kan skabes i solcellekomponenten vha. forskellige lysiscenesættelser. Se uddrag af Gruppe 5's aflevering i illustration 3.14. (Arkiv 4)

Her ser de studerende solcelle komponenten med et æstetisk objektiv og fremkalder helt andre billeder af en ellers teknisk bygningskomponent. Deres undersøgelser er visuelt givende, især fordi de er kategoriseret indenfor deres egne definerede begreber og fordi de indenfor hver undersøgelse har en række billeder, hvor de justerer lyset, hvorved der fremkommer variationer i udtrykket, der er visuelt sammenlignelige. Her oversættes den teknologiske komponent til en komponent, der indeholder muligheder for visuelt at fremkalde effekter med lyset.

Ill. 3.12, Uddrag af øvelse 1, 2 og 3 fra Gruppe 5. (Arkiv (4))



Gruppe 5 kommer efter deres øvelser frem til, at der er muligheder men også begrænsninger i den transparente solcelle komponent, de undersøger. De formulerer derfor deres program således:

"The unexplored potential of the solar panel lies in the rigid system. Therefore we have chosen to work with that system by making different pattern experiments. To use the solar panel in the most energy efficient way, it is necessary that the serial connected cell planes appear in the same sizes. But other than that they can be explored in many different ways." (Arkiv 5)

De studerende analyserer komponentens muligheder, men også begrænsninger, fordi de kender teknikken i de vinkelselektive PEC celler og kan konsultere forskerne indenfor teknikken for detaljer. De studerende arbejder frem mod at fastholde de parametre, der er værdifulde i en arkitektonisk kontekst, men også mod at ændre på panelernes ensformige horisontale ornamentering. Gruppen arbejder med *"patterns, serial connections and systems, and how these patterns can create effects with the light transmitted through the panel"* (Arkiv, 6). De studerende arbejder systematisk, ved at tegne mønstre og relatere dem til de krav, der er knyttet til teknologien og de relaterer disse mønstre til andre elementer fra arkitekturen og naturen. Endelig tester de mønstrene i mock-up 1:1. De sammenstiller nye mønstre med de eksisterende, ved at undersøge dem i forskelligt lys situationer. Alt dette præsenteres i en matrix, hvor de illustrerer den regulerende, kommunikerende og producerende component, façade og rum. (Arkiv, 6)

I "Final Matrix" (Arkiv 6) fremstår det, at de studerende betragter og kommunikerer deres arbejde i et bredt tværfagligt regi, da de besvarer alle spørgsmålene i matrixen i deres endelige præsentation. Derved skabes et spænd i både skala, fra komponent over facade til rum og i værdierne fra producerende over kommunikerende til regulerende. De studerende kombinerer i deres præsentation det målte, beregnede og oplevede materiale. Gennem deres præsentation opleves et naturligt flow i deres tværfaglige beskrivelse og demonstration af potentialerne i komponenten.

Projektet omkring det tværfaglige samarbejde opleves givende for alle parter i projektet. Projektet blev videreudviklet i et større regi finansieret gennem ELForsk. I Projektgruppens fælles slutrapport til Energistyrelsen formuleres udbyttet således:

"Two important, tangible results of the project is an educational course for about 40 students at the Aarhus school of Architecture which was concluded with an open exhibition, and a catalogue in which the potentials of light-filtering solar cells were presented with focus on an illustrative interdisciplinary dissemination..... The project was carried out as an actual interdisciplinary cooperation between Danish Building Research Institute (SBI), Danish Technological Institute, VELFAC A/S and Aarhus School of Architecture. The interdisciplinary working form and a close dialogue between the partners has been important for the completion of the project and in order to ensure a good knowledge compilation and dissemination in all the partners different fields of expertise. The dissemination strategy through the entire project has been to communicate message, the examples and the results both nationally and internationally through contact with students, through dedicated public appearances, in dialogue with Danish architects and in the media. The dissemination has been characterized as being general-purpose when needed and dedicated and precise in other situations when exact specialist knowledge was communicated." (Hansen, 2006) (Arkiv7)

Hvilken ny viden bliver genereret i dette eksperiment?

Modellerne er beskrevet gennem billeder og ord, disponeret indenfor kriterier og skala i matrix. De kvalitative kommunikerende værdier kunne beskrives mere præcist, hvis det var tydeligere, hvad der observeres og det derved kunne evalueres gennem evalueringens kriterier, der ikke er formuleret i projektet.

De studerende arbejder meget i billeder frem mod en mundtlig præsentation, som på traditionel vis på arkitektskolen. Her bliver viden eksplicit, men ikke baseret på evaluering. Den viden der produceres gennem eksperimenterne formidles i bred sammenhæng som en beskrivelse af projekterne og demonstration af mock-ups. Den viden de studerende har tilegnet sig, har formentlig en værdi i kraft af, at de har erfaringer og metoder og erkendelse, der kan overføres som tavs viden til andre projekter. Men der udarbejdes ikke videnskabelige rapporter eller artikler, der kan kommunikere viden i en bred videnskabelig eller praksisrelateret sammenhæng.

I forbindelse med forskningsprojektet "Transparente solceller", udarbejder Artur Slupinski PhD afhandlingen "*Sol-slør - Udvikling af undersøgelsesteknikker til design af lysfiltrerende solcelleruder*". PhD projektet er et transdisciplinært samarbejde mellem Arkitektsolen Aarhus, Teknologisk Institut og Norges Teknologisk-naturvidenskabelige Universitet (NTNU). Slupinski tager afsæt i den vinkelselektive PEC solcelle teknologi og viden udviklet i EX1 og EX2 og udvikler her videnskabelige metoder og teknikker til arkitektonisk formgivning af lysfiltrerende solcellepaneler. I lyslaboratorieforsøg udvikles skalamodeller med forskellige transparente koncepter, der udsættes for varieret lyspåvirkning. Slupinski udvikler 5 eksperimentgrupper for forskellige lysfiltreringsprincipper og undersøger disse i skalamodellerne. Deres indvirkning på det optiske indeklimate måles og observeres gennem fotoregistrering. Evalueringens parametrene er: Gennemsigtighed, farvegengivelse, modellering, belysningsniveau samt kontrastforhold.

Slupinski konkluderer:

"Derfor er det oplagt, at et af fremtidige forskningsområder indenfor koblingen af arkitektur og solceller bliver at afprøve, hvordan en arkitekt effektivt kan komme med i udformningsprocessen af solcellepaneler til specifikke bygningsprojekter. Et andet forskningsområde af betydning er at afprøve overvejelserne omkring de arkitektoniske potentialer i praksis - med solceller samt 1:1 målestoksforhold. Dette er nødvendigt, eftersom en ting er at belyse potentialerne med billeder og idéer, en anden ting er at se tingene i ægte størrelse, ægte rum og ægte solceller." (Slupinski, 2009)

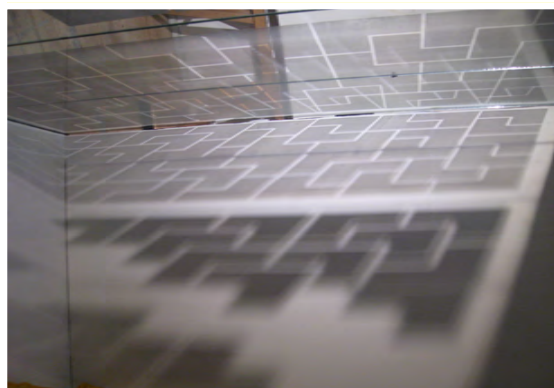
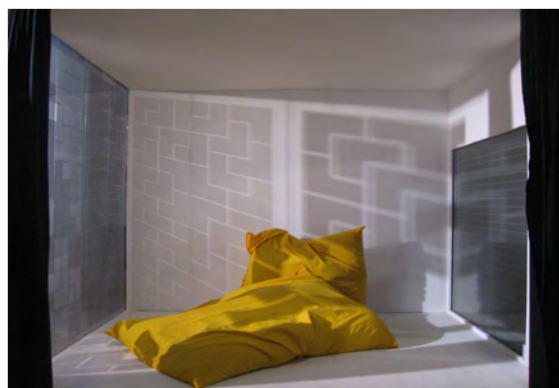
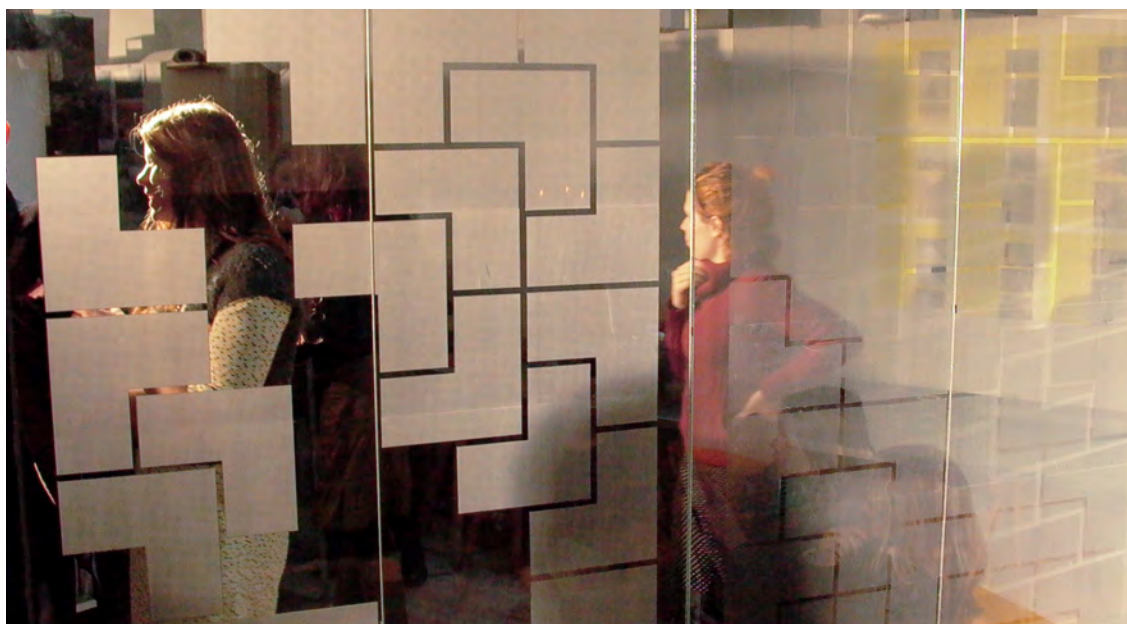
Slupinski demonstrerer, at det er muligt at udvikle videnskabelige metoder til evidensbaserede eksperimenter om lysfiltrering i ruder, hvilket er nyttigt på et videnskabeligt niveau. Det er imidlertid en helt anden proces og kompleksitet, der vanskeliggør en fastholdelse af det legende og kreative i processen i arbejdet med lysets potentialer i transparente facader. Det er derfor vigtigt at fastholde, at eksperimenter både kan være videnskabelige og foregå i laboratorier, men at de også kan være mere umiddelbare og legende, som i de mock-ups de studerende udvikler på baggrund af de faciliteter, de har til rådighed og den beskedne viden de har fået under deres indledende øvelser.

Resumé og model

Resultaterne fra EX2 demonstrerer, at de studerende er blevet motiveret af at arbejde med viden om lys fra flere fagområder til at understøtte deres proces med at komponere og iscenesætte transparente solcelle komponenter. I denne proces har de studerende skabt nye kvalitative værdier til eksisterende komponenter, ved at iscenesætte komponenterne således, at lyset skaber lys- og skyggespil i komponenten, facadekompositionen og rummet bag, hvilket de illustrerer gennem konstruktioner i 1:1.

Definitionen af de tre kriterier opleves som værdifuld, til at holde fokus på de tekniske og funktionelle aspekter i afsøgningen af æstetiske parametre og er derved motiverende for den kreative proces. Det er muligt, at arbejde med kriteriernes indbyrdes påvirkning ved forskellige virkemidler og vægte løsninger indenfor såvel regulerende, kommunikerende og producerende værdier.

III. 3.13: Mock-up



III. 3.14 Mock-up



Det er observeret, at den tværfaglige formidling af viden, de tre skalaer – komponent, facade og rum – er effektiv i beskrivelsen af viden om komponenterne i en arkitektonisk sammenhæng og ikke som traditionelt som enkeltstående elementer. Formidling af de *producerende, kommunikerende og regulerende* værdier kan derimod fremstå abstrakt og kompliceret ved ekstern formidling, da disse kriterier nok kræver en indføring for forståelse af deres betydning. Formidlingsmæssigt vil det derfor være en fordel, at skelne mellem arbejdsmatrix og formidlingsmatrix/metoder, hvor sidstnævnte er mere enkel.

I forhold til Schöns tre definitioner af eksperimenter beskrevet af Hansen et.al (2003) jf. Kapitel 2, er dette eksperiment the move-testing experiment, idet der i eksperimentet er en formuleret intention og at der foretages en form for refleksioner. Eksperimentet ligger mellem de to eksperimenter Schön betegner som producerende hhv. tavs og eksplicit viden, hvilket er i fin overensstemmelse med, at der er tiltag til, at viden kan kommunikeres generelt og struktureret, men ikke i videnskabelig forskningsbaseret regi, idet der ikke er formuleret deciderede evaluerings parametre som hypoteser for de kvalitative værdier.

Samarbejdsformen kan betegnes som *interdisciplinary*, der ifølge Kofoed (2013) defineres af Meeth, som studier der integrerer forskellige discipliner til løsninger af et specielt problem. Som når studerende i EX2 integrerer fagligheder fra teknologiske udviklingsmiljøer og integrerer disse i deres design og iscenesættelse af ny teknologi. Der er i EX2 en større grad af integration af forskellig faglighed end i EX1, hvor viden blev transporteret og oversat til abstrakte former. I EX2 er der tale om at bearbejde en konkret teknologi og konkrete komponenter og at sammenstille viden fra flere faggrupper i kommunikationen. Det er ikke tilfældet, at viden indenfor de forskellige fagområder syntetiseres sammen til ny viden, der går ud over disciplinerne.

Processen kan illustreres som i nedenstående teoretiske proces model. Her vises, hvordan viden fra forskellige fag, kulturer og produkter tilføres de studerende. Disse er kategoriseret i criteria, der udvikles gennem øvelser inden for et af kriterierne, nemlig det kommunikerende. Undersøgelserne syntetiseres i et program for endelig at blive udviklet og demonstreret gennem en mock-up, *construction*. Denne dokumenteres gennem billeder og beskeden tekst. Programmet formuleres indenfor de tre criteria, ligesom kommunikationen foregår indenfor de tre criteria. Herved er de tre *criteria* gennemgående i hele processen.

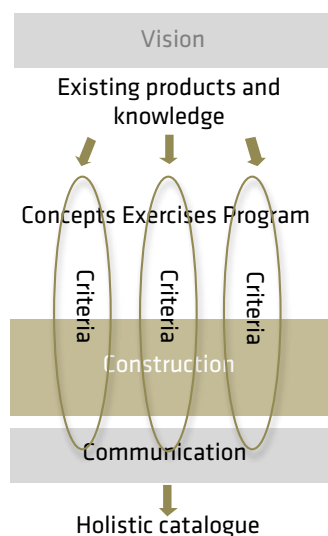


Fig. 3.2: Proces Model EX2

EKSPERIMENT 3

Fra komponent til bygning, der giver mere end den tager

Et eksperiment om at designe et energiplushus – Bolig for livet – med gode dagslysforhold, godt indeklima og høj arkitektonisk kvalitet. Kvalitative og kvantitative værdier er defineret og udviklet og testet i processen på tværs af fag og kulturer.

Bestyrelsen i VKR Holding A/S besluttede i 2006 at investere i at deres datterselskaber, VELUX, VELFAC og Sonnenkraft udviklede og opførte en række enfamiliehuse, der skulle demonstrere, hvordan firmagruppens produkter kan overholde de forventede stramninger på energiområdet i det danske bygningsreglementet gældende fra 2020.

Et af disse huse er udviklet og opført med facadevinduesproducenten VELFAC som projektleder. Huset er det første af i alt 8 demonstrationshuse, der er opført som eksperiment i fem forskellige europæiske lande. Idet det er det første, var der fra virksomhedsgruppens side meget åbne rammer for såvel proces som program og målsætning.

Det har givet mulighed for at sammensætte et team på tværs af kompetencer i VELFAC spændende fra produkt designer, teknisk chef over salg til marketing. Herudover deltog

produktspecialister fra VELUX og WindowMaster samt arkitekter fra AART arkitekter og ingeniører med speciale i energidesign fra Esbensen Rådgivende Ingeniører.

Ill. 3.15: Projektgruppe ved første workshop hos AART arkitekter, her afsøges vision og mål på taget af tegnestuen, symbolsk peger deltagerne i alle retninger for at finde "kursen".



At designe, opføre og teste Bolig for livet var en mulighed for VKR Gruppen for at afprøve, udvikle og kommunikere processen og udvikle og teste interaktionen mellem nye og fremtidige produkter fra firmagruppen. Produkter fra fem virksomheder i firmagruppen blev integreret; et nyt energioptimeret facadevindueskoncept, en ny kombineret solvarmepumpe, et intelligent styringssystem, solvarmepaneller og tagvinduer skulle integreres i bygningen.

Ved at kalde projektet et eksperiment kunne projektgruppen stile efter at udvikle læring/viden ved at afprøve en vision og en målsætning uden at kende slut resultatet – derved flyttes fokus fra at kunne efterleve et program, som derved bliver defineret derefter, til at demonstrere, at gruppen gennem en vision kunne formulere de rigtige spørgsmål. Derved er det muligt at dele generel viden og erfaringer gennem processen med såvel interne som eksterne parter. Virksomheden fik således mulighed for at skabe en ny form for kommunikation om deres position som "first mover" i facadevinduesindustrien, gennem kommunikation om udvikling af visioner, eksperimenter, tværfaglige processer og interaktion mellem firmagruppens produkter og samarbejdspartnere.

Dette eksperiment er atypisk, idet der var, muligheder for at gennemføre en design proces, hvor design, opførelse og test af bygningen var målet i sig selv. Der var derfor stillet midler til rådighed til at udfolde disse processer. Specielt er den lange testperiode usædvanlig, i forhold til gængse design og bygge projekter.

Beskrivelse af huset findes bl.a. i [4] "Denmark's net-zero energy home". Artiklen beskriver bygningen, målet, energi konceptet og teknologier, strategier med vinduer og arkitektoniske potentialer og erfaringer fra de første 14 måneder med testfamilie.

Proces og metoder

Eksperiment 3 (EX3) var bygget op omkring fire indledende workshops, hvor den tværfaglige projektgruppe gennemførte en række øvelser. Det er oplevelsen, at disse workshops dannede et værdifuldt fundament i projektgruppen. Her definerede gruppen sammen en fælles vision og værdi kriterier med afsæt i viden fra alle parter såvel industri som ingeniører og arkitekter. Kriterierne blev integreret gennem hele processen.

Workshop 1: Kick off, forventningsafstemning, afklaring

Workshop 2: Endelig målbeskrivelse og vægtning af parametre til program.

Workshop 3: Rumprogram, herunder funktioner og relationer mellem rum.

Lyset er en gennemgående parameter.

Workshop 4: Fastsættelse af koncept for projektforslag.

1: Vision

I EX3 lykkedes det, at skabe en fælles vision og motivation for hele gruppen tidligt i designprocessen. Visionen blev skabt gennem de to første workshops og opleves som meget værdiskabende og motiverende for hele den tværfaglige gruppe, idet den indeholdt et mål, som alle i gruppen fandt stor motivation i at arbejde engageret hen imod. Visionen blev formuleret indenfor hvert af de tre kriterier.

Ved det første møde i projektgruppen deltog partnere fra industrien, arkitekter, ingeniører og en filosof. Ved dette møde blev en interview øvelse gennemført. To grupper skulle repræsentere forskellige interessenter så som byggeindustrien, arkitekter, ingeniør, myndigheder og brugere. De to grupper skulle i et 2020 fremtidsscenario beskrive, hvorfor projektet var blevet en succes. De blev supporteret af en meget positiv interviewer. Interviewet blev filmet og redigeret som dokumentation. Udsagn fra interview øvelsen:

"en proces i bevægelse....man tænkte i løsninger frem for problemer....gav plads til forskellige fagligheder....myndighedsbehandlere nu med som aktive medspillere i processen, politiske krav kunne nu skabe muligheder ikke begrænsninger....industrien, nu som aktiv medspiller om at skabe innovation indenfor, at tænke udvikling som hele bygningen....vi skaber viden og kan byde ind med ny viden....flytte grænser for, hvad vi definerer som lykke...arbejde med naturen, skrælle alle de unødvendige lag af, skrælle alle måleenhederne af og se tingene i den store sammenhæng, hvor lyset spiller en central rolle for, hvordan du kan bruge det som element, meget naturligt og stærkt....vi har en datter der er blevet energi kommissær nede i EU. Fordi, det at hun har boet i huset, har givet hende interesse for det energirigtige. Den tanke, der egentlig lå til grund for det, var at vi tager ikke mere, end vi giver tilbage..." (Arkiv, 7)

Den sidste sætning, med afsæt i brugerne og værdierne i at leve i et hus, der "ikke tager mere end det giver tilbage", bragte gruppen til en forståelse af, at hverken energimål, salgsværdi eller arkitekturpriser kan matche visionen om et hus, der efter en familie har boet i det i 10 år, ikke har taget mere (energi) end det har givet tilbage. Bruger tilgangen blev af en samlet projektgruppe oplevet som stærk i det lange løb og blev omformuleret til en vision, som hele gruppen kunne se værdi i at efterleve – at udvikle og opføre det første hus i Danmark der ikke tager mere end det giver tilbage. Dette statement var senere brugt i kommunikationen og definitionen af Active House Specifikationerne. Titlen for de første Active House Specifikationer var: "ACTIVE HOUSE – a vision, Buildings that give more than they take." (Velux, 2010)

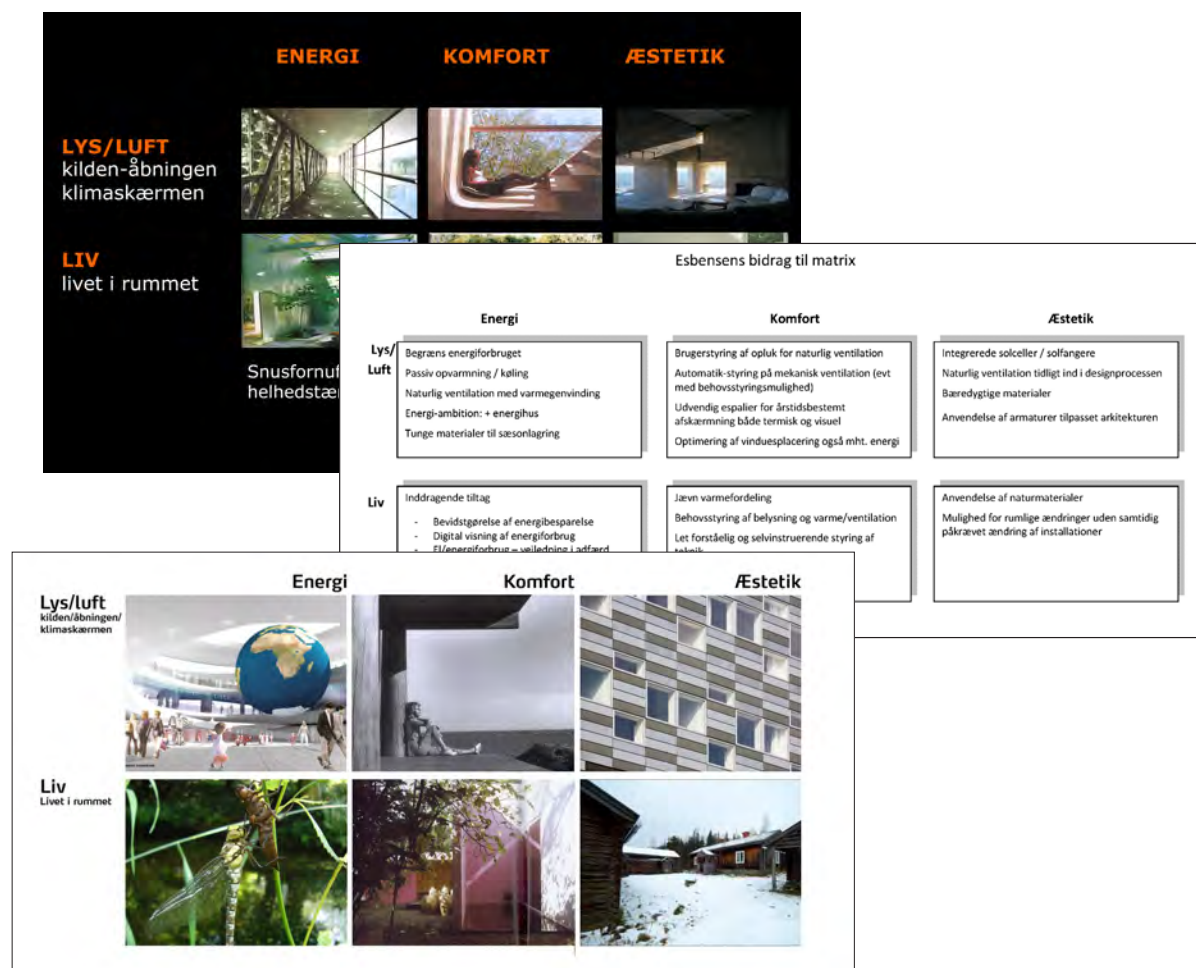
Brugerudsagnene repræsenterede hver af de tre kriterier og blev indarbejdet som målsætninger for projektet. For en mere detaljeret beskrivelse af processen og forholdet mellem bruger udsagn, målsætninger og Active House specifikationer se "Home for Life - design process" afsnit 2. [2]

2: Criteria

Den interne projektgruppe i VELFAC udviklede gennem en pre workshop de tre værdikriterier: energi, komfort og æstetik, som blev benyttet gennem hele projektforløbet.

På den første workshop W1 blev en øvelse gennemført, hvor partnerne præsenterede deres forskellige definitioner af de tre kriterier. Øvelsen blev gennemført, for at skabe en fælles forståelse for kriterierne. De forskellige parter præsenterede definitioner forankret i deres forskellige fagområder, interesser og kulturer for kommunikation.

Ill. 3.16: De tre parter definitioner af de tre kriterier. Illustrerer, hvordan arkitekterne præsenterer i billeder, produktet designeren fra industrien i både billeder og fakta og ingeniøren i ord og tal.



Præsentationerne gav input til de indledende diskussioner, hvor gruppen kom tættere på en fælles forståelse for kriterierne, og hvordan de forskellige vidensområder kunne indgå i dem.

På den anden workshop, W2, blev projektet drøftet med afsæt i de tre kriterier. Input blev registreret i en mind-map og organiseret efter kriterierne - det var intentionen at definere mål for kriterierne men der var ikke muligt, på daværende tidspunkt, men gruppen blev mere detaljeret og præcis i deres drøftelser.

Med afsæt i bruger tilgangen, blev en anden øvelse implementeret i processen ved W3. Projektgruppen definerede i to grupper "personas". De definerede detaljerede beskrivelser af de individuelle karakterer i familien, som havde boet i huset i 10 år.

Familiens behov og oplevelser af at have boet i huset blev formuleret som målsætninger og emner indenfor de tre kriterier.

"..not the parameters of the physical properties of the house at the time when it was constructed. Therefore, the overall objective define qualitative parameters with focus on how a family will experience the house after 10 years (in 2020) of living in it." [2]

På den fjerde workshop, W4, blev fire forskellige design koncepter præsenteret af arkitekterne. Disse blev diskuteret og analyseret i grupper med fokus på potentialet i fortællingen, der kunne formuleres omkring de enkelte vinduer. De bedste "fortællinger" blev udvalgt fra hvert projekt, og efterfølgende syntetiseret til ét koncept.

De efterfølgende projektmøder blev gennemført ved at såvel mødenotater som dagsordener blev disponeret efter de tre kriterier. Dette gav anledning til, at produktspecifik såvel som energi teknisk, inde-klimatisk og konstruktiv viden blev præsenteret, italesat og syntetiseret overfor hele projektgruppen.

Gruppen definerede ikke et konkret program, hypotese eller forskningsspørgsmål i den tidlige design fase. Det var ifølge dagsordener fra de første møder hensigten, at definere program og mål, der kunne evalueres. Men det var på daværende tidspunkt ikke muligt for gruppen, at definere endelige mål i et program. I stedet var projektet forankret i visionen, som var defineret indenfor de tre kriterier, og som essensen i eksperimentet var det processen der førte til bestemmelse af målene. Disse målsætninger blev gennem processen præciseret og kunne løbende føde ind til programmet og endeligt i evaluerings fasen som evaluerings kriterier.

III. 3.17: Matrix med mål, virkemidler og produkt (Bolig for livet, Velfac, 2009)

Program	Energi	Æstetik	Komfort
Mål	I Bolig for livet produceres mere energi end der forbruges. Energooverskud tilbagebetaler materialers energindhold over ca. 40 år. Energiforbruget dækkes af vedvarende energikilder, vurderes i et helhedsperspektiv og søges minimeret gennem optimering af bygningsdesignet.	I Bolig for livet er der i spændingsfeltet mellem energi-optimering og høj komfort smukke løsninger der appellerer til vores sansoplevelser og skaber indtryk af nærvær, indlevelse og betydning. Oplevelserne skabes via rumligheder der understreger energioptimerede løsninger, integration af vedvarende energi, stedets særlige karakter og dagslysets potentialer.	I Bolig for livet skal funktionelle rammer og et godt indeklima sikre et komfortabelt og sundt liv i boligen. Komfort og indeklima optimeres gennem bygningsdesign med fokus på gode dagslystforhold, adgang til frisk luft, god kontakt mellem inde og ude, fleksible plandspositioner, samt i forhold til valg af materialer og vedligehold.
Virkemidler			
Liv	Energiforbrug og -produktion er en naturlig og integreret del af livet i og omkring boligen.	Livet i boligen og samspillet med naturen afspejles i udtrykket i de 5 aktive facader og den rumlige komposition.	I funktioner og relationer mellem de fleksible rum er livet i boligen et gennemgående tema.
Lys	Optimering og aktiv regulering af dagslyset for at reducere brugen af elektrisk lys.	Samspil mellem lys, materialer og rum. Aktive facader dimensioneres og orienteres for optimeret udnyttelse af lysets æstetiske potentialer.	Lysindtaget formes omkring lystfortællinger om det liv der leves i og omkring huset.
Luft	Optimering af facade og bygningsvolumen for naturlig ventilation som suppleres med behovstyret mekanisk ventilation med varmegevinding.	Bygningsens form afspejler naturligt luftflow, passiv opvarmning og integration af udvendige vedvarende energikilder mod syd.	Høje termiske komfortkrav. Rigeligt med frisk luft, ingen træk.
Vinduer			
Profiler	Nyt energioptimeret vindue med slanke profiler af nyt varmeisolerende materiale. De slanke profiler sikrer stort varme- og lysindfald.	Slanke profiler, der giver et let og elegant udtryk. Lette sammen- og indbygninger, hvor profiler ikke ses indefra. Facadebeklædning og inddækninger harmonerer med rammeprofilers materialitet.	De slanke profiler giver god rumlig sammenhæng mellem inde og ude samt ingen vedligeholdelse.
Lysninger	Lysningspaneler forbedrer linjetab og formidler dagslyset langt ind i rummet.	Lysningspaneler formidler dagslyset samt skaber god rumlig overgang mellem inde og ude.	Lysninger udgør rum i rummet, samt møbler som sidde-riche.
Afskærmninger	Udvendig automatisk solafskærmning optimerer lys- og varmeindtag. Indvendig afskærmning fungerer som natsolering.	Afskærmningen udtrykker den aktive facade via forskellige udtryk afhængigt af behov og klima. Afskærmningen tillader optimal dagslysendtag i forhold til afskærmning for varme.	Afskærmningen understøtter det liv der udspilles i husets fleksible og aktive rumligheder.
Ruder	Energioptimerede ruder, 3-lags glas med argon.	Naturligt dagslys.	Ingen kulde ved ruder.
Styring	Intelligent trådløs og integreret styring til optimering af energiforbrug via passiv opvarmning og afskærmning af facader, styring af lys, ventilation og varmeanlæg.	Skjult.	Styring foregår automatisk med mulighed for manuel betjening via udbygget brugerinterface. Styringen samkøres med andre funktioner for at optimere komfort og brugervenlighed.

3: Construction

Huset blev opført i 2007- 2008. Byggeprocessen var udfordrende, da nye konstruktioner, produkter og systemer skulle integreres. Der opstod derfor mange detaljer, som blev løst på byggepladsen ved hjælp af viden fra alle projektparter. Især var det værdifuldt at industriens parter kunne indgå i dialogen om at finde løsninger til de udfordringer, der opstod under opførelsen. Det var af stor værdi, at såvel byggeindustriens parter, arkitekter, ingeniører som byggefirma alle var motiverede for at finde de rigtige løsninger, for at eksperimentet kunne efterleve gruppens fælles vision.

4: Evaluation

I EX3 lykkedes det, at definere evalueringens kriterierne indenfor de tre kriterier. Det blev her demonstreret, at de tre forskellige kriterier kunne evalueres indenfor de forsknings- og videnskabs traditioner. 1. energiberegning og måling af energiforbrug og -produktion, 2. målinger af indeklima og antropologiske undersøgelser af beboernes oplevelse af komforten i huset samt 3. æstetik, som blev defineret ud fra beboernes oplevelse og observationer fra projektets parter.

“Just imagine if the quality of our buildings was valued on their ability to improve quality of life”. Dette citat var visionen for forskningsprogrammet MIMA forankret i VKR Holding, hvor kvantitative og kvalitative målinger af 8 demonstrationshuse skulle underbygge Active House visionen om bygninger, der giver mere end de tager. Her blev en matrix udviklet med de tre design kriterier på den ene akse og på anden akse defineredes ”Design Phase”,

”Construction Phase” og ”Operation Phase”. I hver fase og kriterium blev værdierne beskrevet som såvel kvantitative som kvalitative. I artiklen *”At måle med mennesker/Measuring Life with Real People”* (Hansen 2010), beskrives det, hvordan livet i et intelligent energi-optimeret hus testes og hvordan de menneskelige faktorer omkring adfærd og komfort kan integreres i disse målinger. Artiklen beskriver også oplevelsen efter de første 6 måneders testperiode med testfamilie boende i huset. Den understreger betydningen i at have en evaluering, der indeholder værdier formuleret bredt, hvilket kan indeholdes i de tre kriterier:

”We need to do away with calculations based solely on theoretical energy consumption, and instead develop design parameters and metrics that produce holistic buildings that cater for the whole person, in balance with the environment. But this calls for new methods of building valuation. Methods which allow energy calculations to be juxtaposed with the qualities that creates value for the people who live and spend time in and around the building. Basically, for the occupants of the homes we build, we have to preserve immediate liveability factors such as being able to sense the warmth and changeability of daylight, the scents (and sounds) of fresh air, of having visual contact with the surroundings, while catering for the need for intimacy and privacy. Buildings of the future must also ensure healthy and comfortable living conditions for their occupants. For these qualitative values to become integral design criteria and requirements for future newbuilds and refurbishment projects, we need to have a means of qualitative valuation and comparison with the quantitative values and requirements such as metered energy consumption and energy generation...” (Hansen, 2010, p.1)

III. 3.18: MIMA matrix -Measurement of Qualitative Meters

	DESIGN PHASE Calculated/preconditions	OPERATION/OPTIMIZATION Measuring inhabited	RESEARCH Analyses
Energy	<ul style="list-style-type: none"> Integrating Active House design parameters in the initiating design phase Energy parameters as architectural expression Experience of creating shape with energy objectives 	<ul style="list-style-type: none"> Secure a high level of precision in detail Tightness in vapour barrier 	<ul style="list-style-type: none"> Experience of living in an energy producing house Relation between living in the house and position in relation to e.g. ecology Feeling of balance between energy and living Effect on everyday-life Increased awareness of energy means
Indoor climate	<ul style="list-style-type: none"> Indoor climate parameters as design tool for creating spaciousness and experience Daylight as a qualitative design tool Air quality as a qualitative design tool 	<ul style="list-style-type: none"> Experiences of building with daylight focus Experiences in relation to fresh air 	<ul style="list-style-type: none"> Experience of general indoor climate Effect on everyday-life to live in an intelligent building Experience of own influence on indoor climate Experience of sounds in building Experience of daylight and fresh air in building
Environment	<ul style="list-style-type: none"> Environment parameters as design tool for integration into landscape and weather means Design in relation to choice of materials and CO₂ content Design in relation to sun and wind Relation between indoors and outdoors 	<ul style="list-style-type: none"> Relation to local building tradition Situation and location in landscape Experiences of effect on existing landscape 	<ul style="list-style-type: none"> Relation between building and area Experience of view and area The transition between inside and outside Experience of the building's transparency Experience of sun's relation to building Experience of wind's relation to building

For en registrering af bygningens drift blev energiproduktion og energiforbrug målt, ligesom data for temperatur, fugtighed og CO2 indhold blev indhentet via sensorer i hvert opholdsrum. Disse data blev opsamlet via WindowMaster's styringssystem og sammenfattet af Ingeniørhøjskolen i Aarhus. For at beskrive familiens komfort i huset, blev familiens adfærd og oplevelser registreret. Disse kvalitative data blev samlet gennem antropologiske observationer af familien ved en antropolog fra Alexandra Institutet i Aarhus. Observationerne blev fulgt op af interviews af familiemedlemmerne og familien førte en dagbog, hvor de noterede deres daglige oplevelser af at bo i huset. De kvalitative og kvantitative data blev herefter sammenlignet. Parallelt blev en log-bog ført, for at alle justeringer og ændringer foretaget for indkøring af huset kunne indgå i vurderingerne. Herved var det muligt, at teste de kvalitative og de kvantitative værdier indenfor de tre kriterier.

Måleprojektet er videreudviklet af Gitte Gylling Hammershøj Olesen gennem PhD projektet *"A Method for Holistic Valuation of Active Houses"*, et samarbejde mellem Aalborg Universitet og VKR Holding og VELUX. I projektet udvikles metoder for værdisætning, hvor de 8 demonstrationshuse, hvoraf "Bolig for livet" er det ene, bruges som cases.

Viden og kreativitet udviklet i processen









Hvordan kan viden om lys fra forskellige fag understøtte en kreativ proces?

I EX3 er viden om dagslys brugt som tværfagligt design element gennem hele design processen. Et aspekt har været at udfolde og demonstrere vinduernes potentialer i et energi optimeret byggeri. Dette udfoldes i artiklen *"The window, a poetic Device and Technical Tool to Improve Life in Energy Positive Homes"*. [2] Her testes hypotesen om, at vinduet som multidimensionelt design element kan udfolde vinduet som et poetisk virkemiddel og teknisk redskab og derved på en gang øge kvaliteten af at bo i huset og energioptimere. For at teste dette defineres fire "vindues design elementer" i "Bolig for livet". I artiklen udforskes det, hvordan disse design elementer er brugt som poetisk virkemiddel gennem parametrene *"expression of space and materials through daylight"* og *"indoor and outdoor relations"*. De tekniske værdier bestemmes gennem parametrene *"functional daylight conditions"*, *"fresh air and comfortable temperature"* og *"solar heat gain"*. [2] Til test af dette benyttes resultater fra følgende metoder fra design processen og måling af Bolig for livet:

"Various methods were used to communicate the poetic and technical elements, often with the window as a central element – from traditional architectural drawings, paintings, renderings and models, to studies of scale models in light laboratories to 3D animations. Estimated energy consumption and production as well as indoor climate values were continuously calculated in the Danish programs BSim and Be06. These calculations were used at all workshops to identify relationships between the technical elements in the different design strategies to be able to communicate across disciplinary boundaries." [2]

Artiklen konkluderer: "...a holistic approach to the window as a design element can be used both as a poetic device and a technical tool to improve quality of life in energy positive homes can be verified and it is clear that the poetic values have an important role in the design. These parameters do not always correspond to the technical needs. The challenge is to develop tools, design strategies and legislation where the complex synergy between technical needs and human needs for the poetic aspects can be united by the window." [2, p. 13]

III. 3.17: De fire vindues design koncepter og matrix [2]

South facing active facade		
		<ul style="list-style-type: none"> - Constitute all south facing façades of the kitchen, the living room and the south facing room on the first floor. - Vertical fixed windows and doors, over which are installed a number of horizontal windows for automatic natural ventilation. - External automatic sunscreen and internal roller blinds adjust the heat gain and light.
East and west facing windows		
		<ul style="list-style-type: none"> - The three windows are placed parallel to each other in the kitchen and in the living room in the north-west corner. - The windows are fixed parts with no pane sections. - Internal roller blinds and external manually operable shutters adjusts light inlet.
North facing roof windows		
		<ul style="list-style-type: none"> - Two bedrooms and the bathroom on the first floor are supported with light from six north facing roof windows. - The pivot windows have automatic window operators, external awning blinds, and internal blackout blinds.
Light cross		
		<ul style="list-style-type: none"> - Four doors giving view and access to the north, south, east and west are visually connected in a cross at ground level. - The concept is repeated on the first floor with openings facing east and west. - The door facing north serves as main entrance. A ventilation window is placed over each of the three remaining doors.

	Quotes from occupants	Measurements and calculations	South facing active facade	East and west facing windows	North facing roof windows	Light cross
Poetic	<p>Expressions of space and material</p> <p>In May 1st writes: "We still notice the many beautiful details of the house, including both the white facade and the changing light in the house. We don't have to get up from the chair and walk to the window to look out. The big windows provide a view whether we are cooking, sitting in the living room or in our rooms."</p> <p>In March 1st writes: "The window sill in the wood-firing window is quite naturally used as a well several times a day. It is a good place to get lost in one's own thoughts with a cup of coffee, or a good place for a friend."</p>		<p>Modernistic, north, big variation of direction, reflections and shadows from daylight throughout day and year. Light steel recessed and equipped by external sun screening. Black white floor introduces reflections.</p>	<p>Classic window: the view as a picture on the wall. The window recess creates a space. The low masonry and masonry light creates characteristic formations. Screening adjusts the expression of the room.</p>	<p>Multi stories. Diffuse and cool daylight. The light has sufficient direction to make outdoor and colors distinct. The characteristic shape of space is accentuated and opened to the north.</p>	<p>Classic white. Emphasis of spatiality across the house. View at every transparency in house layout.</p>
	<p>Indoor and outdoor relations</p> <p>In December 1st writes: "It feels like sitting right in the drift, without being cold. The view provides additional light - white in white. The frosty sky looks extraordinarily beautiful from the house, because from there we have a view of the entire horizon and its cool pastel shades."</p>		<p>Free view of sky horizon, garden, landscape and sky. Floor and walls contrasting outside and inside access through doors accentuates indoor/outdoor relations. Large glazed areas make less in interior climate required.</p>	<p>Visual contact with roof and some facing terrace and contact. Provides the possibility of looking through the house from north to south.</p>	<p>Opens the room to the sky in north, which is often illuminated directly by the sun and creates big contrasts throughout day and year. (likely due to no peak in possibilities).</p>	<p>Strong effect caused by opening the house to all four corners of the world. Sky to terrace in all four directions.</p>
	<p>Functional daylight conditions</p> <p>1st writes: "It is nice to have so much light in the house. The character of the light changes with the weather, lowering my husband has to put down the additional sun screen of the balcony in the office during the day."</p> <p>Tanya (1st) (the Anthropologist writes: "The family has the experience that they use less electrical light than in their old house and they mention the great amount of daylight intake as one of the things they will miss the most, when they move back to their old house from the apartment."</p>		<p>Check high (summer) and low (winter) sunlight. Need glare screening. Daylight intake from other directions required to prevent glare. Daylight is too high.</p>	<p>Big pane with large light intake. Check low sunlight in the morning and evening. Manual screening to control light intake. Fine reflection of light in recesses.</p>	<p>Well distributed light from the sky. High CE (relatively small window areas). Good light is achieved by mirror in the bathroom. Night screening required.</p>	<p>Contribute by distributing daylight peak from east, west and in particular from north of the sun.</p>
Technical	<p>Fresh air and comfortable temperature</p> <p>1st from December: "A Sunday with plenty of sun and more than 20 degrees in the living room we had to have the automatic control ventilation couple of times... The house keeps the warmth, which we could benefit from later that evening and that night. It is still waiting you know."</p> <p>In May 1st writes: "When we experienced in January how the low sun could heat the house up to all 20 degrees by frosty weather we heard outdoor heat in the summer half year. However, we manage to keep a pleasant temperature. On hot days, the house feels cooler than the temperature outside. It does not take much heat to activate the sun screening and ventilation. Usually the house is prepared to provide heating and the air in the house is always fresh."</p>		<p>Good position for fresh air - natural ventilation. Easy powered direct sunlight during summer. Automatic external sun screening and natural wind. No need for optimal for solar collector climate.</p>	<p>The window has no opening - no ventilation. Risk of temporary overheating in the morning or evening.</p>	<p>Good opening solution for natural ventilation. No risk of overheating.</p>	<p>Ventilation operation (wind, wind, south) create natural ventilation. Relatively small glass areas with no contribution to overheating. Screening in rooms on first floor recommended.</p>
	<p>Solar heat gain</p> <p>1st: "We hope for a very sunny winter to support the balance of energy. Cool weather has a completely new meaning to us now."</p>		<p>Energy plus (despite reduction of heat contribution due to sun screening). In practice, the glass area is not different levels for solar heat gain and could be increased.</p>	<p>Energy needed. The large pane has a relatively high U-value.</p>	<p>Energy minus due to small solar heat gain, but solar window area relative to CE means only little importance for total energy contribution. Energy loss equaled by energy plus windows in south facing roof.</p>	<p>Together the four doors, are energy needed.</p>

Hvilken type viden bliver genereret i denne proces?

Konklusionen ovenfor underbygger værdien i at arbejde med viden på tværs af discipliner i design processen, hvilket kan motiveres gennem de tre kriterier i det arkitektoniske eksperiment.

Et konkret eksempel på værdien i at sammenstille lysets kvalitative og kvantitative værdier i design processen, er den sydvendte facade i projektet. Beregninger viser, at den nederste del af glasfacaden er uhensigtsmæssig i forhold til varmeisolering, da det er vanskeligt at lave en velisoleret samling mellem vindue og gulv. Et andet negativt forhold er solvarme fra den høje sommarsol, idet den nederste del af den sydvendte facade ikke afskærmes af tagudhæng. Derved tilføres rummet varme på et tidspunkt, hvor der ikke er behov for det. Det vil både i et energi- og indeklimaperspektiv være en fordel, ikke at lade ruden gå til gulv, ved at lave en 30-40 cm høj brystning ved gulv. Dette kunne blive en generel anbefaling, hvis ikke projektet havde indhentet og vurderet brugernes udtalelser omkring værdien i at vinduet går helt til gulv. I december skriver den kvindelige bruger i familie 2 i hendes dagbog:

"It feels like sitting right in the drift, without being cold. The snow provides additional light - white in white. The frosty sky looks extraordinarily beautiful from the house, because from there we have a view of the entire horizon and its cool pastel shades". [10, p.7]

Denne observation er interessant, da den peger på de nye potentialer, der findes i de nye energioptimerede vinduer, med meget lav varmetransmittans og derved minimal kulde nedfald ved vinduet. I marts skriver samme bruger:

"The snow around the house has disappeared, and the terrace in front of the kitchen is visible again. It suits the kitchen with the slate tiles that continue out on the terrace, one of the details we have fallen in love with when we bought the house." [10, p.7]

Her er der modsætninger indenfor de forskellige design kriterier, hvilket underbygger betydningen i at definere værdier på tværs af kriterier og vægte disse i design processen.

I *"Home smart Home A Danish Energy Positive Home Designed with Daylight"* [1] stilles skarpt på, hvordan intelligente teknologier integreret i et enfamiliehus, og primært vinduet, skaber udfordringer og muligheder for, at designe bygninger med bedst muligt miljø for mennesker og natur. Mod en tværfaglig og flerdimensional tilgang, behandles samspillet mellem dagslys defineret i tekniske termer og dagslys defineret i æstetiske, arkitektoniske udtryk. Der fokuseres på behovet for, at definere kvantitative og kvalitative værdier og sammenfatte disse i en flerdimensional tilgang til design, mod at lade huset tilpasse sig vejr og årstid, opfylde de menneskelige behov for de personer der bor i huset, sammen med at imødekomme et minimalt energibehov. Således integrerer vinduet som centralt multidimensionelt design element i energi-positive bygninger både æstetiske og tekniske potentialer. Denne integration af kriterier fra forskellige områder kan både understøtte og modarbejde hinanden i design processen. I artiklen argumenteres der derfor for, at en multidimensionel tilgang til energi optimeret byggeri er central.

I EX3 er det demonstreret, at viden kan evalueres og formidles, indenfor de tre kriterier, og derved indenfor forskellige metoder forankret indenfor de tre videnskabelige traditioner. Det er demonstreret, at bygningen samtidig kan opleves som en udstilling. Derved kan helheden demonstreres gennem en "story telling" eller "showroom". Dette giver mulighed for, at kommunikere viden gennem besøg i huset. Her vil bygningen opleves som helhed via oplevelsen af værdien i at bygningen er syntesen af mange fagligheder omkring en fælles vision.

Samtidig er det muligt, at kommunikere gennem videnskabelige resultater fra de tre kriterier, hvor naturvidenskabelige metoder benyttes til at bestemme kvantitative målinger, som evalueres i forhold til hypoteser om f.eks. energi forbrug og produktion samt indeklimaforhold, ligesom metoder fra humaniora kan bruges til at producere viden om brugernes trivsel og adfærd.

Resume og model

Visionen, der er defineret på baggrund af fælles øvelser, opleves som en væsentlig kilde til at skabe den tryghed og det engagement der var i gruppen gennem hele processen, hvilket er motiverende for en kreativ proces. Et andet aspekt for den kreative design proces er, at det er muligt, at vurdere design ideer i et energi- og indeklimate perspektiv samt at meget produktspecifikke spørgsmål behandles på tværs af projekt gruppen løbende i processen. Dette forårsaget af at specialister i projektgruppen kunne definere effekten på alle tre kriterier, hver gang et virkemiddel blev testet.

I EX3 er det demonstreret, at viden kan evalueres og formidles, indenfor de tre kriterier og videnskabelige traditioner. Der er således et potentiale i at generere viden gennem evaluering af de forskellige kriterier ved brug af forskellige metoder og traditioner. Da målsætninger og designelementer er blevet defineret indenfor de tre kriterier i processen, er denne transparent og kan beskrives i videnskabeligt regi. Ikke blot som en oplevelse eller en historie, men også som hypoteser og spørgsmål, der bliver udforsket, evalueret og kommunikeret som ny forskningsbaseret viden.

Processen kan illustreres som i nedenstående teoretiske proces model EX3. Her vises, hvordan viden fra forskellige fag, kulturer og produkter tilføres. Viden er kategoriseret indenfor de tre kriterier. Viden udvikles gennem øvelser og formuleres til en vision og senere til evaluerings parametre for endelig at blive syntetiseret og afprøvet og demonstreret i en bygning, construction, som opføres, demonstreres og testes gennem målinger og observationer. Kommunikation foregår indenfor de tre kriterier, samt på tværs af disse. De tre kriterier gennemgående i hele processen og en samlet projektgruppe syntetiserer viden på tværs af fag til ny viden, der ikke er forankret i en faglighed, men som tilstræber at efterleve en vision. Derved arbejder gruppen i hht. Meets definition transdisciplinært, jf. Kapitel 2.

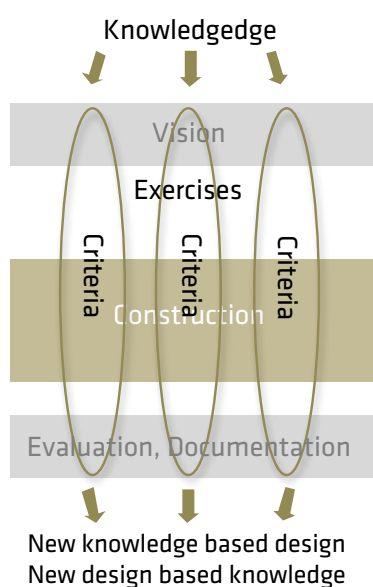


Fig. 3.3: Proces Model EX3 Architectural experiment basic model

SAMMENSTILLING AF DE TRE MODELLER

Der er i alle eksperimenterne defineret tre kriterier (*Criteria*). De er defineret som specielle fokus- og vidensområder for de enkelte eksperimenter. Kriterierne refererer til viden fra forskellige fagområder, der skal motivere til nye kombinationer af viden og kulturer i design processen. Denne viden er kvalitativ såvel som kvantitativ. For at skabe en fælles forståelse og analyse af disse kriterier er der i eksperimenternes forundersøgelser udviklet mindre øvelser og begrebsafklaringer. I alle tre eksperimenter er lys brugt som multidimensionalt design element, hvor viden om lys er introduceret tidligt i processen gennem de tre kriterier. Denne viden om lys er integreret i den kreative proces, hvilket har motiveret til design løsninger, der indeholder tekniske, funktionelle og æstetiske parametre, der fremkalder nye arkitektoniske potentialer med lyset som æstetisk, teknisk og funktionelt virkemiddel.

I alle tre eksperimenter udvikles en eller flere modeller (*Constructions*) til syntetisering og afprøvning af værdierne. Det er her kreativiteten kommer i spil gennem kompositionen med lysets multidimensionale design elementer. Konstruktionen kan afprøves via oplevelsen af at være i den og via målinger og andre registreringer. Det er her der skabes et produkt, der kan evalueres på forskellige niveauer og ved forskellige metoder og det er her, der skabes en fælles referenceramme, en syntetisering af de tre kriterier og fagligheder i projektgruppen, en transformation af viden.

Kriterierne benyttes gennem processen, specielt i EX3, til definition af mål indenfor hvert kriterium, til programmering og til vurdering af forskellige virkemidler. Derved er viden indenfor alle kriterier vægtet/syntetiseret ind i de løsninger, der afsøges og ind i de valg der foretages i processen. Til systematisering af processen og de mange elementer er der i de to sidste eksperimenter udviklet matrix, hvor kriterier udgør den ene akse og mål, virkemidler og program den anden. Denne matrix er et simpelt redskab til kommunikation på tværs af faggrupper i projektgrupperne og til strukturering af viden og derved til at skabe overblik og rum til kreativitet.

Potentialet og udfordringen med eksperimentet er, at man ikke ved hvor det fører hen – derfor er det også svært at definere et mål og evaluerings parameter, hvilket er observeret i de tre eksperimenter. Visionerne er svære at evaluere. **Der er et potentiale i, at skabe bedre mulighed for at evaluere og derved overføre erfaring og tavs viden fra forsøgene fra et design objekt til forsknings baseret viden.**

Ved at sammenligne de tre proces modeller illustreres det nedenfor, hvordan viden fra de tre kriterier er integreret og syntetiseret på tværs i processen gennem hhv. *vision, construction og evaluation*. Ved reference til Meeth's definition af samarbejdsform og Schöns definition af eksperimentets type, defineres forskelligheder i samarbejdsform og eksperimenttype i de tre eksperimenter.

Hvordan kan viden om lys fra forskellige fag understøtte en kreativ proces?

Proces modellerne illustrerer, at de tre kriterier er indarbejdet på forskellig vis. Kriterierne i EX1 er kun en del af den tidlige pre designfase, hvorimod kriterierne i EX3 er gennemgående fra definition af vision, over øvelser til konstruktion og ikke mindst i evaluering og kommunikation. Nedenfor redegøres for forskelle i de tre metoder.

I EX1 anvendes de tre kriterier kun i den tidlige designfase. Her omsættes viden fra andre fagområder til design elementer. Således er viden om solcelle teknologi, indeklima og transparens indarbejdet i den kreative proces mod at udforme en solcelleintegreret transparent facade, der fremkalder nye arkitektoniske potentialer. De arkitektstuderende tilegner sig viden fra andre fag, oversætter denne viden og integrerer den i den kreative proces. De arkitektstuderendes arbejde er ifølge Meeth's definition (Kofoed 2013) *crossdisciplinary*, idet de henter viden fra andre fagområder og bruger den i design processen, jf. beskrivelse af samarbejdsformer i Kapitel 2. Denne viden kommunikerer gennem designet (modeller) til de tekniske udviklingsmiljøer, der oversætter den til design parametre til udviklingen af fremtidens solcelleteknologi.

I EX2 fastholdes kriterierne gennem hele processen. Øvelserne i den tidlige design fase er koncentreret omkring ét kriterium, de *kommunikerende* værdier, fordi formålet med eksperimentet er, at fremkalde arkitektoniske potentialer i komponenter, der allerede er tilgængelige på markedet. Det betyder, at der er fokus på at definere kvalitative værdier og at kommunikere disse sammen med de kvantitative værdier, der er defineret af andre parter i projektet. De studerende kommunikerer de kvantitative og kvalitative værdier gennem en dertil udviklet matrix. Her arbejder de sammen på tværs af fag. De kommunikerer sammen, men skaber ikke sammen, hvilket betyder, at viden ikke transformeres men blot oversættes i form af en matrix. Dog sker der i design processen en syntetisering af viden, når de studerende inddrages viden fra andre discipliner i deres kreative design proces. Samarbejdsformen kan ifølge Meeth defineres om *multidisciplinary*.

I EX3 defineres visioner indenfor de tre kriterier. Visionen opleves som kilde til motivation og engagement fra de forskellige parter. Kommunikation gennem de tre kriterier har en stor indflydelse på beslutninger i design processen. Et andet vigtigt aspekt for den kreative design proces er, at det er muligt at vurdere ideer på værdierne i et energi- og indeklima perspektiv på alle niveauer i processen forårsaget af, at specialister er en del af teamet. Deres viden kommer i spil, da der løbende defineres hvilken effekt de forskellige virkemidler har på de tre kriterier. Denne proces kan karakteriseres som en "*hybrid imagination*", hvor tekniske, videnskabelige og kunstneriske fag knyttes sammen på en ny måde. jf. Kap 2. Processen kan ifølge Meeth's definition defineres som *transdisciplinary*, idet der i processen ikke arbejdes i faggrupper, men med viden, der indhentes fra respektive fageksperter for i fællesskab at efterleve en fælles vision.

Hvilke typer viden genereres i de tre eksperimenter?

De tre eksperimenter illustrerer, at den viden, der genereres i eksperimenterne er forskellig, idet den i EX1 er tavs, i EX 2 er både tavs og eksplicit og i EX3 i høj grad eksplicit. Dette er bestemt af, hvordan kriterierne fastholdes gennem processen og om der defineres evaluering kriterier, hypoteser eller spørgsmål, der kan evalueres.

I EX1 er viden kommunikeret gennem en designet, konstruktion, der kan opleves og diskuteres og derved skabe billeder af, hvordan de transparente solceller kan påvirke form og rum og derved skabe nye arkitektoniske potentialer. Ved reference til Schöns(1991) tre eksperimenter jf. Kapitel 1 i afsnittet "*Det arkitektoniske eksperiment*" kan EX1 betegnes som *the explorative experiment*.

I EX2 er alle tre kriterier anvendt gennem processen og formidlet gennem en matrix. Denne viden repræsenterer de forskellige fagområder. Samtidig kan konstruktionen udstilles og opleves, men derudover er der en dokumentation af viden, der kan formidles til forskellige områder indenfor de tre kriterier og skalaer, som eksperimentet udvikles og kommunikeres gennem. Dette eksperiment kan beskrives som *the move-testing experiment* jf. Kapitel 1.

I både EX1 og EX2 finder evalueringen sted i form af diskussioner på baggrund af præsentation af og observationer af de designede modeller. Der er ikke et forskningsspørgsmål, en hypotese eller et program, som kan evalueres. Det betyder, at det meste af den viden, der udvikles i processen, forbliver tavs og kan ikke generaliseres. Formålet med projektet er, at give de studerende erfaringer i processen og give input til tekniske forskningsmiljøer, hvilket er indfriet. Men det vurderes, at processer som disse vil kunne skabe mere værdi, hvis det var muligt at udvikle metoder, hvor kriterierne kan evalueres for derved generere et generaliseret videns output, som kan føde ind fremtidige projekter.

I EX3 formidles og evalueres viden indenfor de tre kriterier, og bygningen kan samtidig opleves som en demonstrationsbygning. Dette giver mulighed for at kommunikere viden gennem besøg i huset samt gennem videnskabelige fremlæggelser inden for de forskellige kriterier. Der er et potentiale i at generere viden gennem evaluering af de forskellige kriterier. EX3 kan jf. Schöns beskrivelser i Kapitel 1 betegnes som *the hypothesis testing experiment*.

Former for formidling af viden i de tre eksperimenter er:

EX1; udstilling, tavs viden om de enkelte konstruktioner

EX2; udstilling og multidisciplinært katalog, tavs viden, men kan sammenlignes med de andre komponenter indenfor kriterierne og de tre skala

EX3; udstilling og videnskabeligt laboratorium og feltarbejde derved kan viden evalueres og derved generaliseres som eksplicit viden

Det er vurderet, at den viden, der opstår i processen, kan skabe større værdi i bred sammenhæng, hvis der er en øget fokus på at skabe sammenhæng mellem vision og evaluering. Visionen er i disse eksperimenter formuleret, med henblik på at skabe motivation for design processen, og med henblik at skabe en bruger orienteret tilgang. **Det observeres som vanskeligt at oversætte denne vision til evaluerings kriterier.** For at viden i større grad bliver evalueret og derved bliver eksplicit og generel anvendelig, er der behov for at udvikle en metode, hvor der skabes kriterier for evaluering. Evaluerings kriterier, der linker visionen og evalueringen. Det er erfaret gennem de tre eksperimenter, at de oplevede værdier er svære at evaluere, idet er ikke har været kendt til metoder for test at kvalitative værdier i forskningsregi. Det er til gengæld erfaret, at både en brugerrelateret tilgang og værdien i at fremhæve de kvalitative værdier er vigtig for processen.

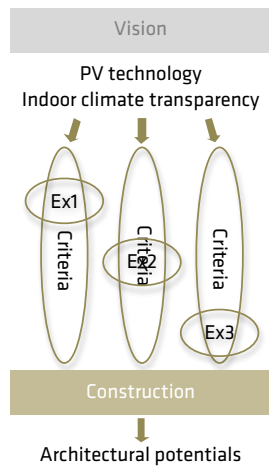


Fig. 3.1: Proces Model EX1

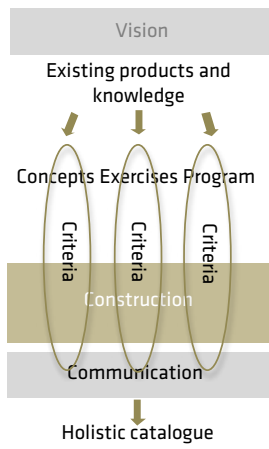


Fig. 3.2: Proces Model EX2

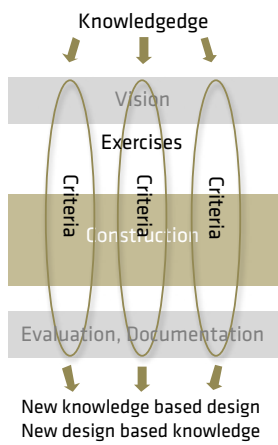


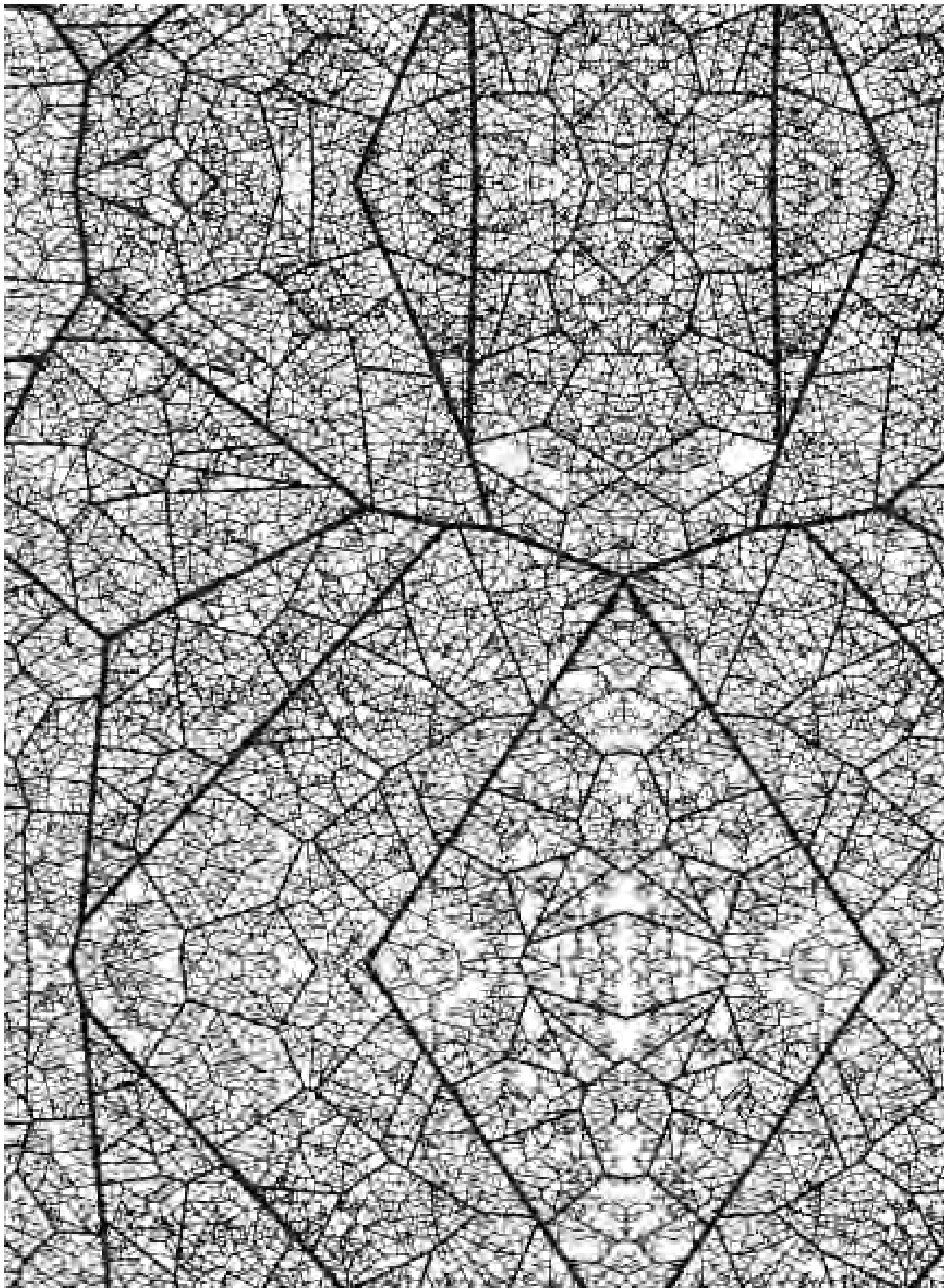
Fig. 3.3: Proces Model EX3, EX Modellen

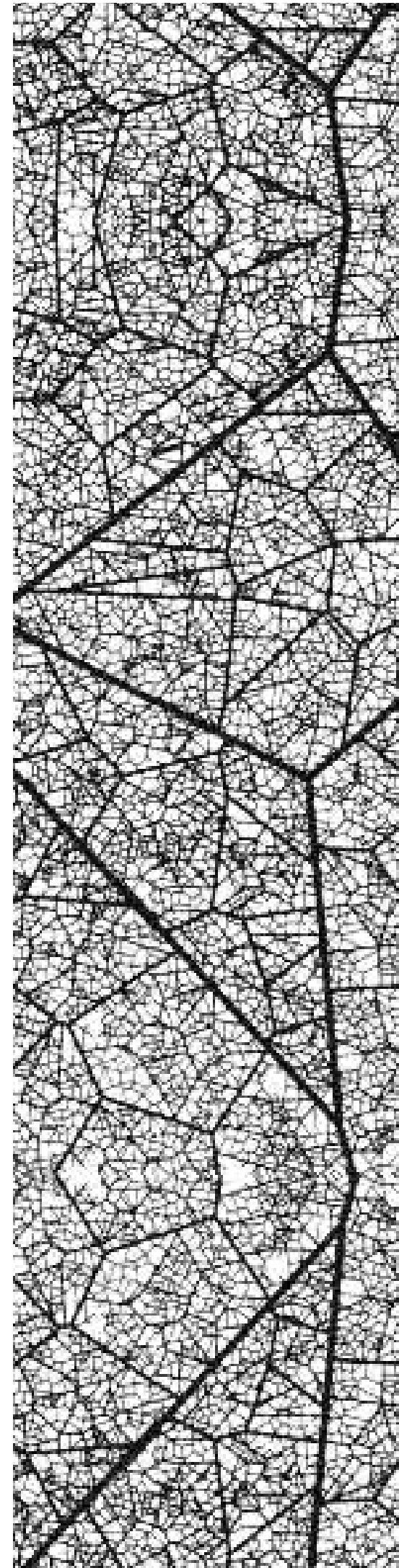
De tre proces modeller er udviklet lineært. Det fremstår, at der er sket en udvikling mod større integration og transformation af viden i transdisciplinært regi. Model 3 fremstår som den model, der med størst tydelighed illustrerer potentialer i at skabe kreative og videns baserede design metoder i transdisciplinære teams med lys som multidimensionelt design element. Derfor vil modellen fra EX3 (EX Modellen) være udgangspunktet for den teoretiske afsøgning mod at udvikle en proces model, der giver et svar på afhandlingens hovedspørgsmål; *hvordan kan lys som multidimensionelt design element motivere en kreativ design proces og generere ny viden, der understøtter en bæredygtig udvikling.*

I Kapitel 4 afsøges de emner, der fra disse empiriske undersøgelser har vist sig at kunne forstærke EX Modellen mod en generel proces model for det arkitektoniske eksperiment. Med afsæt i teorier om innovative processer studeres forholdet mellem viden transporteret, oversat og transformeret i processen for endelig at føre den nye viden tilbage. Desuden diskuteres det, hvorledes visioner defineret tidligt i processen kan udgøre forskningsspørgsmålet i eksperimentet og derved fremhæve potentialet i at benytte metoder fra forskningen til at fastholde visioner eller imaginations. Endelig diskuteres det via referencer til humaniora, hvordan der kan hentes inspiration fra metoder med en bruger praksis tilgang til definition af design kriterier og evalueringens parametre.

III. 3.20. Matrix med sammenfattende beskrivelse af de tre eksperimenter og deres input til faser og metoder i processen

	EX1 Fra teknologi til producerende vindue	EX2 Fra komponent til producerende rum	EX3 Fra komponent til producerende bygning
Partnere og viden	Arkitektskolen Aarhus (AAA), Kunstakademiets Arkitektskole – arkitektoniske potentialer Teknologisk Institut (TI) - Indeklimateknologi PEC Group, - solcelleteknologi	AAA - arkitektonisk potentialer TI, PEC Group - solcelleteknologi, energi produktion, indeklimateknologi VELFAC - Produktudvikling og markedspotentialer SBI - Lystransmittans LT og transparens	VELFAC - facadevinduer, teknik, design, salg og kommunikation VELUX - ovenlysvinduer, teknik WindowMaster - intelligent styring og naturlig ventilation AART Arkitekter - arkitektur Esbensen Ingeniører – integreret energi
1. VISION	Overordnet om at belyse nye arkitektoniske potentialer i vedvarende energi teknologier Ingen vision eller imagination knyttet de enkelte projekter	Overordnet om at belyse nye arkitektoniske potentialer i vedvarende energi teknologier Ingen vision eller imagination knyttet de enkelte projekter	Defineret af projektgruppen som fælles vision En bygning, der ikke tager mere end den giver tilbage Vurderet meget værdifuldt i projektforløbet
2. CRITERIA	1. Teknologi 2. Funktion 3. Æstetik	1. Regulerende 2. Kommunikerende 3. Producerende	1. Energi 2. Komfort 3. Æstetik
3. CONSTRUCTION	Rumstore mock-ups 1:1 bygges med sydvendt glasfacade med modeller af transparente solceller	I mobile rammekonstruktioner integreres transparente solcelle- komponenter i facaden 1:1	Bygning opført i 1:1, facade og ovenlysvinduer, intelligent styringssystem, solvarme integreret
4. EVALUATION	Modeller observeret, diskuteret og udstillet. Ingen evaluerings kriterier. Tavs viden	Modeller observeret, diskuteret og udstillet. Katalog med matrix. Ingen evaluerings kriterier. Tavs viden + struktureret viden indenfor 3 kriterier og 3 skala	Bygning observeret, diskuteret og udstillet. Der foretages kvalitative og kvantitative målinger og observationer, indenfor de tre kriterier. Eksplicit viden struktureret indenfor kriterier
Øvelser	Øvelse 2: build a PEC cell in scale 1.000.000:1 Øvelse 2: place various materials in a pane and observe and analyse the expression Øvelse 3: build an office space, guide the daylight Scale 1:10	I tre indledende øvelser analyseres og oplevelse af de æstetiske og arkitektoniske potentialer i transparente solcellekomponenter	WS1: Kriterier og mål WS2: 2020 scenarium, mindmap WS3: Personas WS4: 4 scenarier, foldet ud WS5: Lys målt oplevet, malet, animeret og beregnet
Samarbejdsform	<i>Cross-disciplinary</i>	<i>Multidisciplinary</i>	<i>Transdisciplinary</i>
Eksperiment type	<i>The explorative experiment</i>	<i>Move-testing experiment</i>	<i>The hypothesis testing experiment</i>
Output og viden	Model kommunikeret, viden tavs	Model og multidisciplinært katalog viden tavs og eksplicit	Bygning, katalog og test af kriterier, viden evalueret indenfor kriterier, eksplicit og generaliseret
Publikationer, der indgår afhandlingen	[1] <i>SOLcelle og -lys – et arkitektonisk potentiale..</i> [2] <i>Fra Rumteknologi til Bygningskomponent..</i> [3] <i>Udvikling og visioner</i> [6] <i>Den transparente energiproducerende glasfacade</i>	[5] <i>Matrix, metode til karakterisering</i> [4] <i>Solceller – et udviklingsperspektiv</i> [7] <i>Produktoversigt – 6 komponenter, målt og vurderet</i>	[8] <i>Dagslys og energioptimering i boligen</i> [9] <i>Denmark's net-zero energy home</i> [10] <i>The Window – a Poetic Device and Technic</i> [11] <i>Home smart Home, designed with daylight</i>





4. INNOVATION, DESIGN OG PRAKSIS

- teorier om viden mod en generel proces model

4. INNOVATION, DESIGN OG PRAKSIS

- teori mod en generel proces model

I kapitel 3 er erfaringer fra de tre eksperimenter, systematiseret og udtrykt gennem en model (EX Modellen, fig. 3.3). Denne model søges i dette teorigang afsnit udviklet mod en generel procesmodel for arkitektoniske eksperimenter (AE Modellen). AE Modellen skal fungere som svar på afhandlingens hovedspørgsmål; *hvordan kan lys som multidimensionelt design element motivere en kreativ design proces og generere ny viden, der understøtter en bæredygtig udvikling?*

Gennem en teoretisk perspektivering i dette kapitel diskuteres det, hvordan forskningsbaseret viden kan genereres gennem det arkitektoniske eksperiment. Kapitlet præsenterer viden indenfor fagområderne innovation, design og humaniora.

I forhold til *"at generere ny viden"* ved at bruge *"lys som multidimensionelt design element"* er der i Kapitel 2 refereret til Gibbons (1994) *"The new production of knowledge"*, og Meets (Kofoed 2013), der taler om transdisciplinære teams. Såvel som Jamison (2011), der taler om *"hybrid imagination"*. De definerer potentialet og nødvendigheden i at gå ud over individuelle discipliner, idet der tages udgangspunkt i problemet eller visionen, og disciplinerne bidrager til løsningen med fokus på, at tænke på tværs af faglige discipliner. I dette projekt i forhold til at bruge lys som multidimensionelt design element.

Erfaringerne fra de tre eksperimenter illustrerer, at der er en værdi i at linke viden på tværs af fag og discipliner gennem de tre criteria og de nye sammenstillinger, der sker i processen gennem *"vision, construction og evaluation"*.

Denne sammenstilling og syntetisering af viden på tværs af faglige discipliner, er illustreret i EX Modellen, fig 3.3. I første afsnit i dette kapitel *"INNOVATIVE PROCESSER - at linke viden på tværs af grænser"* relateres EX Modellen med modeller fra teorier indenfor innovative processer, baseret på vidensdeling på tværs af faglige grænser. Derved underbygges modellen teoretisk og justeres mod en generel AE Model.

Det fremgår også fra observationerne af de tre eksperimenter, at der kan skabes større værdi, hvis der udvikles en metodik for, at viden udviklet i processen i højere grad kan evalueres. I afsnittet *"DESIGN RESEARCH - at linke forskning og design"* studeres teori indenfor design forskning, for at beskrive forskningsspørgsmålets og hypotesens rolle i forhold til at generere *ny forsknings baseret viden* i design processen. Ligesom teorier indenfor inddragelse af forskellige forskningsmetoder i design processen studeres og relateres til Modellen for det arkitektoniske eksperiment.

Endelig er det observeret gennem de tre eksperimenter, at der er en værdi i, at der i designprocessen skabes en bruger relateret tilgang, i såvel definitionen af visionen som i evalueringen. Dette er særlig relevant i relation til at skabe en bæredygtig udvikling, hvor det er brugerens ageren i praksis, der er i bestemmende for et faktisk energiforbrug, hvilket er et vigtigt modspil til teoretiske beregninger og forudsætninger. I afsnittet *"HABITUS OG PRAKSIS - at linke humaniora og design"* perspektiveres processen til teorier indenfor

habitus og practice theory. Derved illustreres værdierne i at inddrage metoder fra humaniora i design processen til såvel definition af brugerrelateret vision som ved evaluerings kriterier, herunder hypoteserne.

Sidst i kapitlet sammenfattes trin, begreber, metoder og teorier i en matrix. Teorier indenfor de tre videns områder, *innovation, design research og practice theory*, udgør den ene akse, mens de fire principper i proces modellen for det arkitektoniske eksperiment, *vision, criteria, construction, evaluation* udgør den anden akse.

Fig. 4.6: Matrix der sammenstiller teorier fra innovative processer, design research og practice theory med de fire principper, der indgår i modellerne for de tre eksperimenter jf. Kapitel 3.

	INNOVATIVE PROCESSES		DESIGN RESEARCH	PRACTICE THEORY	
Principles in EX Model	Carlile Knowledge boundaries Boundary objects	Hargadon Knowledge Brokering	Bang Experiment Entrance level	Koskinen Design Research	Bpurdieu, Gram-Hansen Habitus, Practice Theory
Collaboration combining fields, research and practice (trust)	4. iterative approach	1. Access Preconditions For innovation New combinations	Entrance level motivation	The lab, field and showroom, Different research cultures meet	Bringing different theories together Objectivism and subjectivism
1. Vision, IRQ motivation cross boundaries related to end user	1. Transfer Syntactic	1. Access	Entrance level - motivation to RQ	From the design tradition	3. engagement, meanings Use verbs related to end users practice
2. Criteria different fields, functions and cultures Hypothesis	1. Transfer Syntactic	2. Access to multiple domains	Leads to hypothesis within each criteria	Criteria represent BOTH lab, field and showroom	The four elements from different aspects
Exercises and concepts communicating and exploring	2. Translate Semantic	3. Learn, gain knowledge of existing	Leads to hypothesis within each criteria	in BOTH lab, field and showroom	
3. Construction exploring/designing synthesizing	3. Transformation Pragmatic	4. Link, recognize share	Testing hypothesis	Showroom/ Field	Field work 1. practical understanding 4. Products, technologies
4. Evaluation Validation Communication		5. Build innovations	Evaluation of hypothesis New research based knowledge	In BOTH lab, field and showroom	4 practice elements user related by using verbs

INNOVATIVE PROCESSER

At linke viden på tværs af grænser

I dette afsnit diskuteres spørgsmålet:

Hvordan kan teorier om innovative processer underbygge og kvalificere, hvordan viden på tværs af faggrænser kombineres og transformeres i modellen for arkitektoniske eksperimenter.

Det gøres ved at det arkitektoniske eksperiment relateres til "knowledge boundaries" og "transferring, translating and transforming knowledge" gennem teori af Poul R. Carlile (2002, 2003) samt til teorier omkring sammenhængen mellem læring og innovation gennem knowledge brokering af Andrew B. Hargadon.

Knowledge boundaries – at transformere viden på tværs af faglige grænser.

"It is not just one of processing or transferring more knowledge, but about "transforming knowledge" to effectively deal with differences, dependencies, and the novelty present at a given boundary.....We understand the problematic nature of knowledge when we see not only how different kinds of knowledge create novelty, but also how dependence across these differences generate consequences as well." (Carlile 2002, p. 443)

Carlile's (2002, 2003) teori om grænser mellem viden (knowledge boundaries) er valgt til at diskutere, hvordan overførsel af viden kan beskrives ved at transformere viden fra forskellige områder, funktioner og faglige kulturer på tværs af faglige grænserne gennem en syntaktisk, semantisk og pragmatisk tilgang. Derved beskrives udfordringer og muligheder i at dele viden på tværs af fag.

Carlile mener, at manglen på fælles sprog og fælles interesser begrænser muligheden for blandt aktører at dele og vurdere viden, idet der er vanskeligt at overføre viden mellem forskellige funktioner, områder og kulturer. Når der arbejdes på tværs af disse, opstår der problematiske "videns grænser", som kan være både en kilde til og en barriere for innovation.

Carlile nævner objekter som modeller som den eneste kategori af grænse objekter, der direkte underbygger en transformation af viden. (Carlile 2003)

Et grænse objekt er beskrevet som et middel til at repræsentere, lære om og overføre viden på tværs af faglige grænser. Carlile (2002) beskriver tre grænse objekter, der skal bevæge sig på tværs af grænser mellem viden (*knowledge boundaries*) i produktudviklingen i en virksomhed.

Et syntaktisk grænse objekt skaber og deler et fælles sprog, som betyder, at man kan kommunikere på tværs af faglige grænser.

Et **semantisk** grænse objekt giver et konkret middel for individer til at specificere og lære om deres forskelle og afhængigheder på tværs af en given grænse.

Ved et **pragmatisk** grænse objekt menes et effektivt grænse objekt, der faciliterer en proces, hvor individer i fællesskab kan transformere deres viden.

Carlile understreger således, at det først er i en pragmatic boundary, at der skabes innovation, idet det er her, der transformeres eksisterende viden ved også at beskæftige sig med de barrierer, der opstår, når denne transformation skal gennemføres. (Carlile 2003)

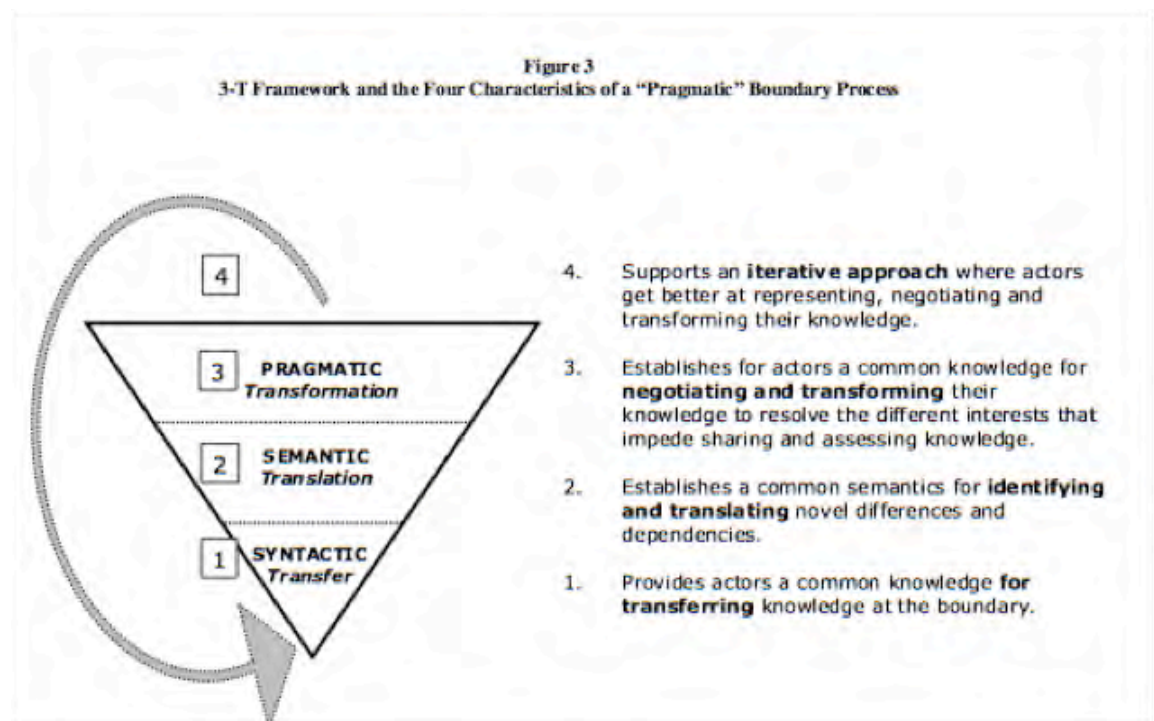


Fig. 4.1: Carliles model for de fire trin i en "pragmatisk" Boundary Process (Carlile, 2003, p.41)

Teori om knowledge boundaries reflekteret i EX Modellen.

Carlile understreger betydningen af at dele og vurdere viden fra forskellige funktioner og faglige kulturer samt betydningen i at transformere denne viden gennem modeller. Carliles tilgang svarer til udgangspunktet for processen i arkitektoniske eksperimenter, hvor viden fra de forskellige funktioner, fagområder og kulturer deles og syntetiseres gennem konstruktion af modeller. I EX Modellen er disse forskellige funktioner, fagområder og kulturer repræsenteret gennem de tre *criteria*. Carlile deler ikke de forskellige vidensområder op i vertikale *criteria*, der udvikles parallelt i processen som i det arkitektoniske eksperiment og definerer derfor heller ikke et antal kriterier.

Carlile beskriver den viden, der er valideret inden for hver criteria og på tværs af kriterierne i hans tre horisontale aktiviteter. Dette svarer til processen i eksperimenterne, hvor kriterier udforskes gennem øvelser og koncepter i et trin og senere valideres på tværs af kriterier ved at designe og konstruere modeller og mock-ups i et andet trin og endelig gennem evalueringen. Dette kan i EX Modellen foregå ved at udvikle en matrix, hvor kriterier definerer den ene akse og de forskellige design elementer den anden. Matrixen sammenholder værdierne på tværs af kriterier.

Kriterier i EX Modellen defineres på baggrund af værdien i at overføre viden fra forskellige områder, hvilket svarer til: *“provide the actors a common knowledge...”*; Trin 1 i Carliles model, Illustration 4.1.

I Trin 2 *“establishes a common semantics for identifying and translating”* i Carlile's model, svarer til den oversættelse af viden, der foregår i de indledende øvelser. Et eksempel på dette er PEC solcelleteknologi i EX1. Den komplekse teknologi er identificeret og oversat af arkitektstuderende, ved at bygge en model i skala ca. 1.000.000:1, der illustrerer principperne i teknologien. Jf. illustration i Kapitel 3. Derved etableres en fælles syntaks, der er læsbar for alle partnere i projektet.

Transformationen af kriterierne i construction i eksperimentet svarer til den transformation Carlile definerer i Trin 3. Carlile understreger betydningen af modellen, hvilket også er et grundlæggende element i EX Modellen for transformation af viden, hvilket primært foregår gennem design i fasen Construction.

Det betyder, at EX Modellen kan defineres inden for de tre trin og de tre begreber, transfer, translate og transform, 1, 2, 3 i Carliles model, jf. illustration 4.2.

Carlile understreger endvidere betydningen af den iterative proces, hvor aktørerne bliver bedre til at præsentere, forhandle og transformere deres viden. Carlile illustrerer dette med pilen i Trin 4, i modellen jf. illustration 4.2. **Dette trin kan med fordel overføres til EX Modellen, ved at tilføje en pil fra videns output til den viden der tilføres eksperimentet.**

Derved illustreres værdien i at producere ny viden gennem det arkitektoniske eksperiment. Carlile diskuterer ikke, hvordan denne videns overførsel i praksis kan iværksættes.

Et eksempel fra de tre eksperimenter på denne tilbageførsel af viden findes i EX2, hvor viden er præsenteret i et holistisk produkt katalog. Projekt partnere og eksterne folk kan læse og observere, hvordan en transparent solcelle komponent evalueres og udfoldes på tværs af forskellige fagområder og funktioner ved at præsentere de kommunikerende, regulerende og producerende værdier for solcellerne som hhv. en komponent, facade og rum, jf. Kapitel 3. Afsnittet *“EKSPERIMENT 2 Fra regulerende component til producerende rum”*

Verberne i Carliles model; at overføre, at oversætte og at transformere viden, (*Transfer, Translate and Transform Knowledge*) er informative idet de illustrerer trinnene i modellen som aktiviteter blandt aktørerne. Verberne kan bruges til at beskrive faserne i EX modellen. I afsnittet om "HABITUS OG PRAKSIS - at linke humaniora og design" længere fremme i dette kapitel, vil verbets betydning blive udfoldet yderligere.

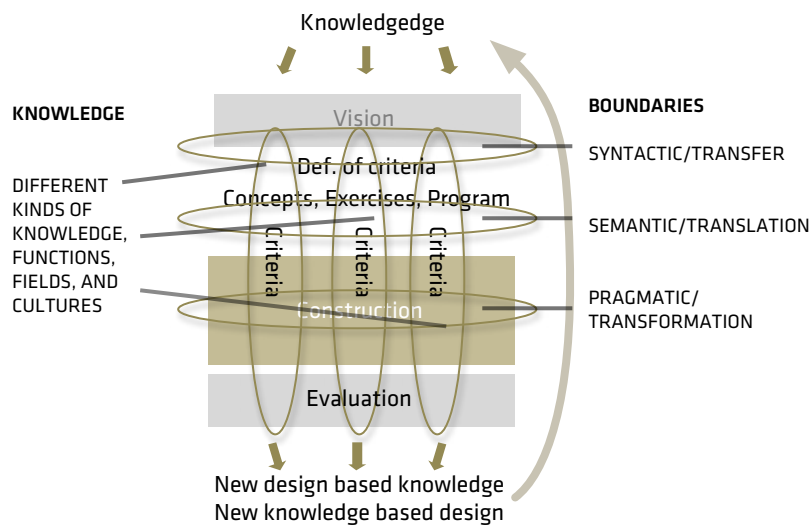


Fig. 4.2: Carliles begreber sammenstilles med principper i EX Modellen. Carliles boundary objects kan beskrives indenfor, vision, øvelser og konstruktioner i EX Modellen. Pilen, der tilbagefører viden, tilføjes EX Modellen, og de tre criteria svarer til Carliles definition af "different kinds of knowledge, functions, fields, and cultures"

Til at beskrive de empiriske observationer og derefter teoretisere om *knowledge boundaries*, anvender Carlile (2002, p.446) betegnelserne *objects* og *ends*. "*Objects*" refererer til samlingen af enheder, som enkeltpersoner arbejder med som tal, prints, mails, redskaber og maskiner. "*Ends*", er resultater, der viser succes med at skabe, måle, eller manipulere objekter (en underskrevet købsaftale, dele af en prototype eller dele i et produktionsled). *Objects and ends* kunne benyttes som metode til at uddybe i EX Model, som en anvendelsesorienteret værktøjskasse, der beskriver *objects*, der kan bruges i design processen, og definere *ends*, som parametre, der kan bruges til at definere om designet er en succes. Dette uddybes i Kapitel 5.

Knowledge Brokering - at linke læring og innovation

I *"Process Model of Knowledge Brokering"* beskriver Hargadon, hvordan innovation er at kombinere eksisterende ideer på nye måder. Dette illustrerer Hargadon med udgangspunkt i, hvordan folk kan dele og rekombinere viden indenfor organisationer. Dette illustreres gennem en model, der linker læringsprocesser og innovation til en større social kontekst, men som tager afsæt i folks individuelle handlinger indenfor organisationerne.

Hargadon mener, at hvad angår innovation, så handler det ikke om det virksomhederne allerede ved er vigtigt. Det handler om hvordan de bruger det de ved til at skabe mening i nye situationer og hvordan de bruger de nye situationer til at skabe mening med det de ved.

"Knowledge brokering involves exploiting the preconditions for innovation that reside within the larger social structure by bridging multiple domains, learning about the resources within those domains, linking that knowledge to new situations, and finally building new networks around the innovations that emerge from the process." (Hargadon, 2002, p.41)

Hargadon skaber en forståelse for, hvordan individer i organisationer skaber innovation fra dele af det store landskab, som tager ny form gennem innovationen. Han peger på, hvordan disse processer er forankret i en global kontekst samt lokalt forankret af individer og grupper.

For at skabe innovation skal problemløserne have forståelse for at udrede eksisterende viden lært i en kontekst og kunne se, hvordan det kan være værdifuld i en anden. Hvordan bliver gammel viden til materiale der skaber ny viden i stedet for at forblive stationært sin oprindelige kontekst? Spørger Hargadon og argumenterer:

*"The conversion from old to new relies on a process of **analogical reasoning**, in which ideas from one domain are used to solve the problems of another."* (Hargadon, 2002, p.45).

Der er ikke taget højde for organisatoriske konflikter m.v. i Hargadons model, og det ligger udenfor denne afhandlings område at inddrage dette aspekt i teoridelen og i de tre eksperimenter.

Hargadons model, der linker læring og innovation i organisationer, illustrerer, hvordan folk deler og rekombinerer viden gennem 5 trin:

- Trin 1 : Adgang, forudsætningerne for innovations processen, ny kombination af eksisterende ressourcer
- Trin 2 : Adgang til flere domæner/vidensområder
- Trin 3 : Folk lærer, får kendskab til de eksisterende ressourcer og problemer
- Trin 4 : Sammenkæder, erkender, hvordan deling kan løse problemer
- Trin 5 : Folk bygger, innovationer i nye domæner

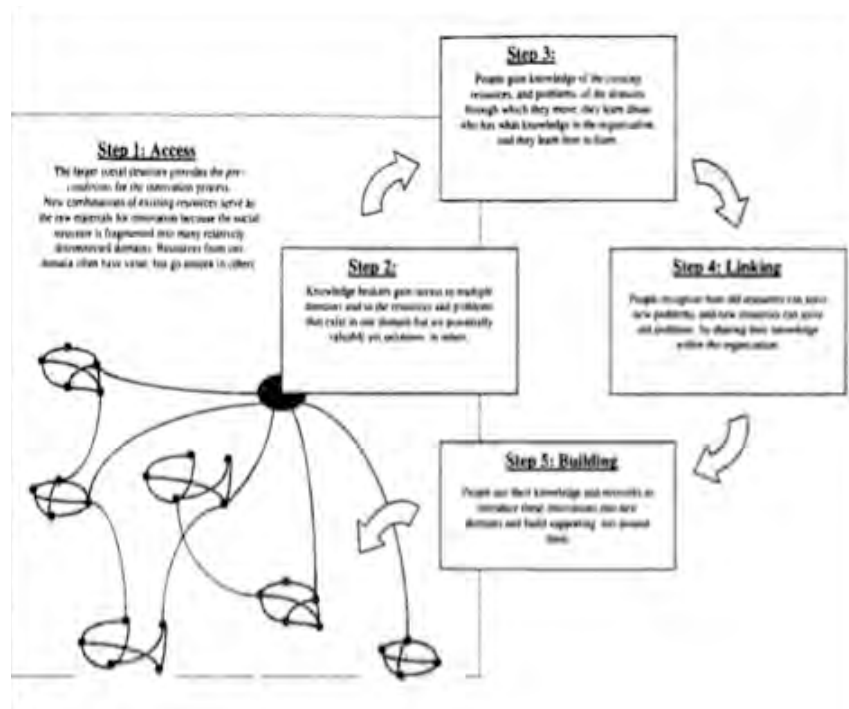


Fig 4.3: Proces Model af Knowledge Brokering (Hagadon 2002)

Teori om Knowledge Brokering reflekteret i EX Modellen:

Hargedons 5 trin kan relateres til processen illustreret i EX Modellen.

Step 1: "Access, preconditions for the innovation process, new combination of existing resources". Det er værdifuldt, at understrege idéen om, ikke blot at kombinere viden ved at sætte forskellige videns parter sammen, men at det er den sociale struktur, der står bag den viden, der giver forudsætningerne for innovationsprocessen. I de tre eksperimenter behandles dette kun indirekte ved at fremhæve værdien i, at partnerne repræsenterer forskellige fagområder og kulturer. Som i EX2, hvor partnerne repræsenterer, arkitektstuderende, folk fra byggeindustrien, forskere der udvikler ny solcelleteknologi samt forskere fra et nationalt byggeforsknings institut. Mangfoldigheden af sociale strukturer bag disse mennesker er værdifulde for den viden, der overføres såvel til processen som fra processen. Dette kan føre til en bevidsthed om disse sociale strukturer og ikke mindst deres betydning for, hvordan den nye viden føres tilbage i disse sociale strukturer, som beskrevet i Hargedons Trin 5. I "EX Modellen" kan denne værdi understreges ved at bruge udtrykket "knowledge from different social structures".

Ikke mindst er det værdifuldt at fremhæve potentialet i at ny viden kan formidles tilbage til en af de sociale kulturer, kommunikeret med en speciel fokus gennem et kriterium, der har relevans for netop den kultur. Eller viden kan kommunikeres på tværs af kriterierne for et mere holistisk billede af den viden, der er genereret i eksperimentet. Således kan viden fra EX2 om, hvordan de æstetiske værdier udfoldes føres tilbage til undervisere, forskere og andre studerende ved arkitektskolen gennem en beskrivelse af det kommunikerende rum, ligesom solcellernes varme transmittans kan kommunikeres til baglandet i Teknologisk Institut via kriteriet det regulerende komponent. Dette kan præciseres i EX Modellen ved at uddybe beskrivelsen af "knowledge" med "new combinations of knowledge".

"Step 2: Access to multiple domains/knowledge", kan relateres til de tre "kriterier" i EX Modellen, hvor flere domæner præsenteres gennem disse. I EX3 præsenterede de forskellige partnere deres individuelle definitioner af de tre kriterier. Ingeniørerne præsenterede tal, arkitekterne illustrationer af rumligheder og erhvervslivets partnere viste illustrationer af mennesker, komfort og produkter, jf. Kapitel 3. Det illustrerer at de repræsenterer forskellige domæner, ressourcer og problemstillinger og disse blev tilgængelige for hele gruppen. **Dette kan præciseres i EX Modellen ved at uddybe beskrivelsen af "criteria" med "Three criteria, access to mixed knowledge".**

"Step 3. "People learn, gain knowledge of the existing resources and problems". I EX Modellen skabes læring og folk får kendskab til de eksisterende ressourcer og problemer gennem indledende øvelser og definition af begreber relateret til de forskellige Criteria. Herigennem skaber de en forståelse for viden fra andre sociale strukturer. **Dette kan præciseres i EX Modellen ved at uddybe beskrivelsen af "exercises" og "concepts" med "learn through exercises".**

"Step 4 . "People recognize how old resources can solve new problems by sharing knowledge". Folk indser, hvordan eksisterende viden kan løse nye problemer ved at dele viden i EX Modellen sker dette ved at transformere den eksisterende viden i "Program", "Construction" og "Evaluation". **Dette kan præciseres i EX Modellen ved at uddybe beskrivelsen af "construction" med "transforming through construction".**

Hargadon definerer i trin 3, 4 og 5 betydningen af enkeltpersoner i processen ved at beskrive de tre trin med verber og ordet "people". "Folk får viden", "Folk genkender" og "Folk bruger deres viden". Denne brug af verber i forhold til "knowledge brokers" (folk) er informativ og understreger betydningen af, at det netop er gennem mennesker, at den primære viden overføres, forstås og integreres. **EX Modellen kan forstærkes, ved at fremhæve dette ved hjælp af verber i de forskellige faser. Som: People imagine through vision, People learn and bridge through exercises, People link and recognize through construction og endelig, People test and explain through evaluation.**

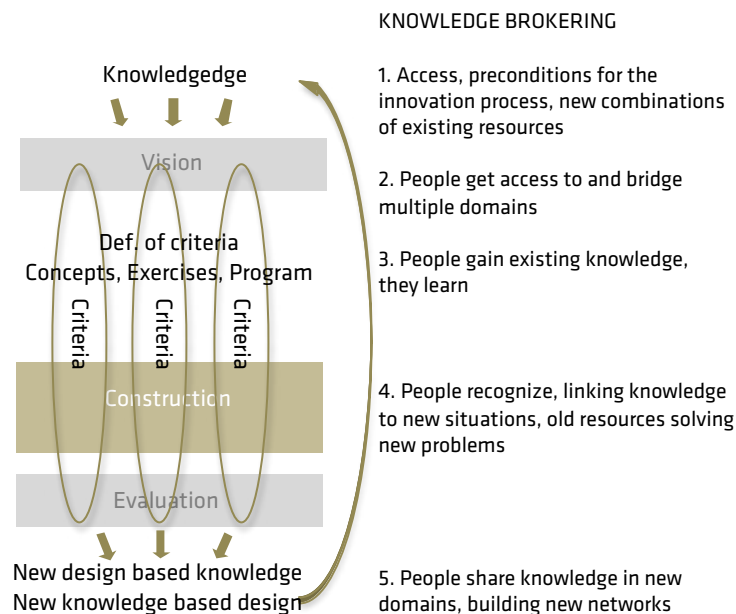


Fig.4.4: Hargadons begreber relateret til EX Modellen

Resume at linke viden på tværs af grænser

Teorien i dette afsnit om innovative processer kan bidrage til, at viden på tværs af faggrænser kombineres og transformeres i modellen for arkitektoniske eksperimenter, hvilket uddybes nedenfor.

Fig. 4.2 og 4.4 illustrerer, hvordan innovations teorierne understøtter EX modellen. Såvel Carlile's som Hargadon's model illustrerer, at der er overraskende lighed mellem deres teorier om innovation og de metoder, der udvikles på grundlag af de tre eksperimenter, hvilket er illustreret i EX Modellen. EX Modellen er udviklet i et kunstnerisk miljø med fokus på at være i stand til at skabe nye arkitektoniske potentialer ved at integrere de tekniske aspekter i design processen og ved at arbejde på tværs af faglige og kulturelle grænser. Fokus har derved været på den kreative design proces og ikke på videns produktion.

Ved at relatere EX Modellen til innovations teorierne illustreres det, at EX Modellen kan defineres som en generel model for at skabe innovation gennem eksperimenter.

EX Modellen kan med reference til innovationsteorierne præciseres omkring videns delen ved at fremhæve at det er "folk", som er kilden til ny viden. Dette understreges ved at benytte *verber (som transfer, translate og transform)* i beskrivelsen af de fire trin, hvilket er tilfældet i begge de to modeller for innovative processer.

Et væsentligt element fra begge innovations teorier er den pil, der illustrerer transporten af viden, der udvikles i processen skal føres tilbage til de kulturer, der er baglandet for processen. Ved at tilføje pilen i EX Modellen kan viden indgå i nye eksperimenter gennem nye kombinationer af videns personer i en iterativ proces. Det er Trin 4 i Carliles og Trin 5 i Hargadons model. Denne tilbageføring af ny viden flytter fokus fra at designe et objekt til værdien af den videns produktion, der udvikles i design processen. **Pilen, der tilbagefører viden til nye kombinationer af videns personer underbygger afhandlingens problemstilling** om, at der er behov for at optimere en bæredygtig udvikling ved at designe med viden om lys fra forskellige fagområder og derved motivere en kreativ proces og generere ny forsknings baseret viden.

DESIGN RESEARCH

At linke forskning og design

Udfordringen i at forbinde design og forskning er, at designeren traditionelt er ansvarlig for at finde løsninger, så produktet fungerer, mens forskeren skal dokumentere en systematisk undersøgelse, hvor det er muligt at dokumentere metode og proces, så denne kan genskabes. Målet med forskning er at skabe denne systematiske kommunikative viden. (Archer 1995, p.6) Forskning er kendetegnet ved at være snæver hvorimod design processen oftest skal være åben og iterativ og udføres i et bredt perspektiv. Hvordan kan disse modsætninger indarbejdes og støtte hinanden i samme design og forsknings proces? Dette undersøges i afsnittet, ved at knytte teori om design forskning til observationerne af processerne i de tre eksperimenter.

Ved at henvise til Schöns udtryk "*reflection-in-action*" og "*learning by doing*" gennem eksperimenter jf. Kapitel 1, kan eksperimentet være det drivende hjul i udvikling af viden gennem design. Men der er et behov for at være mere præcis i processen end den traditionelle arkitektoniske design proces, som Schön beskriver. I Kapitel 3, er det observeret, at der i de tre eksperimenter, er begrænset mulighed for at validere viden gennem evaluering for derved at overføre erfaring fra eksperimenterne til general forskningsbaseret viden. Der er behov for at processen indeholder en systematik, der muliggør denne validering.

Potentialerne i at kombinere forskningsmetoder indenfor design, humaniora og naturvidenskab er beskrevet i mange sammenhænge. Flyvbjerg (2005) og Romme (2003) beskriver potentialerne i at kombinere design, videnskab og humaniora ved at fremhæve mulighederne i at bruge design inden for organisatorisk forskning:

"Science helps to understand organized systems, from outsider position, as empirical objects. The humanities contribute to understanding, and critically reflection on, the human experience of actors inside organized practices.....in view of the gap between theory and practice, design could be included as one of its primary modes of engaging in research" (Romme, 2003, p.558).

Romme argumenterer for, at design er karakteriseret ved at have fokus på at finde løsninger styret af bredere formål og målsætninger samt at design udvikles og bygges på design proportioner der er testet i pragmatiske eksperimenter og funderet i organisatorisk videnskab.

A. Geroges L. Romme refererer til Herbert Simon (1996), der skriver:

"The idea of design involves inquiry into systems that do not yet exist – either complete new systems or new states of existing systems. The main question thus becomes, "will it work?" rather than, "Is it valid or true? Moreover, design research draws on "design causality" to produce knowledge that is both actionable and open to validation." (Simon in Romme, 2003, p.558)

Simon understreger i ovenstående citat, at det er muligt at producere relevant og valideret viden gennem den samme design proces. Han fremhæver vigtigheden i at fokusere på målet ikke produktet. Hvilket igen understreger betydningen af, at der i et eksperiment er defineret et mål gennem en vision/imagination og dertil relaterede forsknings spørgsmål i forhold til at skabe værdi og fælles motivation.

En teoretisk ramme for design forskning er defineret i "Design Research Through praxis from Lab, Felt, and Showroom". Koskinen m.fl. (2011). Her defineres sammenhængen mellem design-forskning og design-praksis for digitale produkter ved at illustrere, hvordan design processer kan reagere på både faglige og praktiske problemer. Forfatterne beskriver, hvordan forskellige traditioner for samarbejde har bygget bro mellem forståelse og det at skabe samt mellem teoretiske og faktiske løsninger.

Koskinen (2011, p.24) skriver, at hans eget firma IDEO har været karakteriseret som "technology brokering", hvor de har fundet problemer og løst dem ved at finde svar gennem kreativ udforskning af teknologi gennem teknik imagination, ikke gennem en videnskabelig tilgang. Det interessante aspekt i design research through practice er, at de går ud over bruger centreret design spørgsmålet og illustrerer, hvordan forskergrupper er begyndt at søge svar på spørgsmål ved på kreativ vis at blande metoder med konceptuelle, teknologiske og kunstneriske midler. Metoder de nævner, er prototyper, spil, collager, "mood boards", "story boards", scenarier, "personas" og rollespil . Disse metoder er velkendte i arkitekturen til at drive den kreative proces, men er som regel ikke sat ind i en teoretisk og forsknings baseret sammenhæng.

Både Schön, Romme, Simons og Koskinen definerer potentialet i at bruge design til at linke eksisterende viden sammen på tværs af fag for at kunne skabe ny forskningsbaseret viden. Med dette afsæt diskuteres i de næste to afsnit spørgsmålet:

Hvordan kan viden skabes ved at integrere metoder fra forskning i det arkitektoniske eksperiment?

Spørgsmålet diskuteres gennem teori om *design research*, der belyser hvordan metoder fra forskellige forskningstraditioner integreres i design processen og mere detaljeret hvordan man kan indarbejde metoder og begreber fra forskning i design processen. Disse to tilgange sammenstilles med EX Modellen for derved at reflektere over spørgsmålet ovenfor.

The lab, field and showroom

Koskinen m.fl. (2011, pp.51-109) beskriver tre traditioner (kriterier) indeholdt i design-forskning, de repræsenterer forskellige metodiske retninger: *the lab, field og showroom*. Hver af disse traditioner er kendetegnet ved at have deres egen forsknings kultur udviklet gennem en teknisk-naturvidenskabelig, samfundsvidenskabelig eller kunstnerisk/humanistisk forskningstradition. Design forskning har derved mange ansigter, og Koskinens formål er, at illustrere, hvordan man i design processen skal forstå forskellen mellem de tre design traditioner for at forstå, hvordan de kombineres i design processen.

The lab knytter sig til naturvidenskab, hvor det er muligt at teste noget, der er taget ud af sit naturlige miljø og bragt ind i et kontrolleret miljø, hvor det kan testes gennem forskellige eksperimenter. Det betyder, ifølge Koskinen, at forskeren får mulighed for at fokusere på én ting ad gangen og at sammenligne simple tests. Målet med laboratoriet er, at definere sammenhænge, der kunne være interessante. På trods af begrænsningerne i den naturvidenskabelige tilgang ift. at undersøge tingene i en større sammenhæng og med større metodefrihed understreger Koskinen, at laboratoriet er det sted, hvor kvalitative, fantasifulde undersøgelser kan foretages - og ofte i den tidlige fase af design processen. (Koskinen, 2011, pp.51-64)

Metoderne i *the field*, feltstudier, er relateret til en observerende social tilgang, hvor forskere arbejder i "marken". Feltarbejdet er relateret til social videnskab som antropologi og fokuserer på mennesker og adfærd. Derved har dette design område et stærkt fokus på produkterne og deres interaktion med mennesker. (Koskinen, 2011, pp.69-82)

Indenfor *The Showroom* definerer Koskinen metoder, der bygger på en tradition fra kunst og design. De er ikke forbundet til videnskabelige metoder, hvilket betyder, at der er få data og analyser. Resultaterne præsenteres i udstillingsvinduer, udstillinger eller gallerier snarere end som conferencebidrag og i bøger. (Koskinen, 2011, pp.98-107) Diskussionen er, om et design objekt eller en bygning, der udstilles kan være forskning, hvilket Koskinen argumenterer for i dette citat:

"Still, one reason for why Showroom has a research following is because critical designers write about their work in ways recognizable to researchers. They tell the whole story from initial ideas to prototypes and how people understand them. The prototypes may be forgotten, but the message lives on in the books." (Koskinen, 2011, p. 94)

The Showroom som forskningsmetode er derved afhængig af debat, hvilket ifølge Koskinen betyder, at design kan have et formål at skabe debat, rykke ved forestillinger, at undersøge et problem, eller at flytte grænser for, hvordan man oplever fremtidens energiproducerende bygninger.

The Lab, field and showroom reflekteret i EX Modellen

Med Koskinens tre metoder, "*the lab, field and showroom*", definerer forsknings baseret viden i et bredt perspektiv. Det er denne brede definition af forskning, der relateres til i denne afhandling, når der tales om, at der i det arkitektoniske eksperiment kan udvikles viden via metoder fra forskellige faglige traditioner. Det fremhæves, at de enkelte metoder ikke kan

stå alene, hvilket er illustreret i observationen af processen i EX1, i Kapitel 3, hvor det er observeret, at viden ikke kan dokumenteres og valideres, hvorfor den forbliver tavs. Processen i EX1 vil ifølge Koskinens definition være Showroom. Der ville skabes mere værdi, hvis EX1 blev kombineret med metoder, der kan skabe eksplicit viden.

Koskinens definition af de tre forskellige forskningstraditioner er interessante i forhold til at underbygge potentialerne i de tre kriterier i EX Modellen. De tre kriterier kan på samme vis repræsentere tre forskellige funktioner og forskningstraditioner. Ved at referere til Koskinens definition af de tre forskningstraditioner bliver det muligt at evaluere parametre indenfor de enkelte kriterier med metoder, der knytter sig til de respektive forskningstraditioner. Samtidig er det muligt at foretage evalueringer på tværs af kriterier samt at sammenholde evaluering fra forskellige kriterier og derved skabe den bredde og åbenhed, der knytter sig til at beskrive arkitektur. **Dette giver et svar på, hvordan man kan skabe forsknings baseret viden og design i den samme proces, jf. introduktionen til dette afsnit.**

Dette kan illustreres i EX1. Her bliver PEC solceller undersøgt og modeller bygget op, til at definere kvalitative værdier. Forsknings traditioner fra naturvidenskab er kombineret med forskning relateret til kunstneriske traditioner. EX1 blev kun formidlet gennem udstilling, hvilket betyder, at læring og viden er givet til andre gennem denne udstilling. I EX3 er alle tre kriterier evalueret gennem forskellige forsknings traditioner. Energikriterier er målt gennem naturvidenskabelige metoder, indeklima er oplevet af brugerne og registreret gennem metoder fra humaniora og samtidig målt via naturvidenskabelige metoder, hvilket betyder, at metoder er mikset. De oplevede værdier er observeret gennem metoder fra arkitektur repræsenterende en kunstnerisk tradition.

De tre eksperimenter kan defineres indenfor Koskinens forskningstraditioner the lab, field and showroom :

EX1 blev præsenteret og evalueret i henhold til showroom.

EX2 blev også kommunikeret i henhold til showroom og målingerne af lys- og varmetransmission er foretaget i henhold til *the lab*.

I både EX1 og EX2 har erfaringen været, at der er potentialer i at blive bedre til at evaluere de kvalitative værdier. Oplevelsen var, at der ikke var kompetencer til at gennemføre validering af rummet, gennem evaluerings metoder forankret i samfundsvidenskabeligt, the field.

I EX2 er de "regulerende" værdier baseret på beregninger og målinger af lys- og varmetransmission gennem komponent og facade. Disse metoder er relateret til the lab. Metoder fra teknisk-naturvidenskabelig tradition. De "kommunikerende" værdier er baseret på at definere og illustrere de kvalitative værdier gennem udtryk af lyset transmittans gennem komponenten, facade og i rummet. Disse metoder er baseret på traditioner fra kunst og arkitektur. Og endelig er de "producerende" værdier, der - ud over beregninger af energiproduktion ved hjælp af metoder fra naturvidenskaben - er definitioner af, hvordan komponent, facade og rum påvirker mennesker. Disse værdier kan defineres ved hjælp af metoder fra the field, forankret i en samfundsvidenskabelig tradition. I EX2 har de studerende defineret de "producerende værdier" på baggrund af deres egne registreringer af, hvordan komponent, facade og rum påvirker dem. Projektets validering vil styrkes, hvis der inddrages metoder til denne form for evalueringer, hvor der inddrages brugere gennem testpersoner, med henvisning til metoder fra samfundsvidenskab. Dette vil blive diskuteret i sidste afsnit i dette kapitel, "HABITUS OG PRAKSIS - at linke humaniora og design".

De tre forskningstraditioner repræsenteret ved Koskinen er særlig interessante i forhold til at designe med lys som et multidimensionalt design element. Den bedste måde at se lyset på er at observere det rigtige dagslys i *the field*. Dette er en metode, der vanskeliggøres af at den specifikke kontekst, vejr og tid ikke kan kontrolleres. Derfor benyttes ofte lys laboratorier, rum, der kan kontrollere et imiteret sollys og himmellys indstillet til at angive bestemte tidspunkter af året og døgnet, hvilket derved udgør videnskabelige kontrollerede forsøg i naturvidenskabeligt regi i *the lab*. Endelig kan man arbejde med lyset i en mere kunstnerisk iscenesættelse, hvor der arbejdes med at frembringe effekter ved lysets møde med stoflighed og rum. Her kan lyskilden vælges og justeres vilkårligt for at frembringe den ønskede effekt, som *the showroom*.

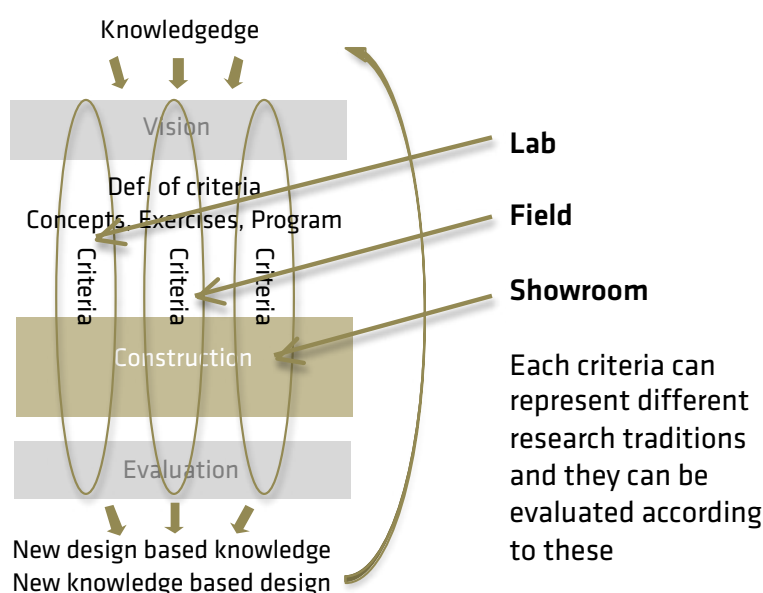


Fig. 4.5: Koskinens definition af tre forskningstraditioner, the lab, field and showroom sammenstillet med EX Modellen¹

Entrance level, forskningsspørgsmål og hypotese

I dette afsnit diskuteres det, hvordan der i EX Modellen kan inddrages metoder fra forskning, og derved understøtte, at der i det arkitektoniske eksperiment udvikles viden, der er forskningsbaseret. Bruce Archer definerer i artiklen *"The Nature of Research"* forskning som:

"Research is systematic enquiry whose goal is communicable knowledge". Archer (1995)

I nedenstående vil det blive afsøgt, hvordan systematikken beskrevet af Archer (1995) kan integreres i processen for det arkitektoniske eksperiment. Der reflekteres over elementer fra forskning som forskningsspørgsmål, hypotese og evaluering og hvordan disse kan integreres i det arkitektoniske eksperiment og derved give et svar til spørgsmålet stillet i dette afsnit: *Hvordan kan viden skabes ved at integrere metoder fra forskning i det arkitektoniske eksperiment?*

Bang, Krogh, Ludvigsen and Markussen (2012) berører dette emne i deres artikel *"The Role of Hypothesis in Constructive Design Research"*. Her præsenterer de et *"entrance level"* som motiverende trin i design processen. Det er her, der er plads til formodninger, forestillinger, antagelser på baggrund af tidligere erfaringer. Det er også i entrance level, at parterne pejler sig frem til den overordnede problemstilling. Det er det trin Hargadon (2002) kalder: *"Step 1: Access, preconditions for the innovation process"*, hvor der skabes nye kombinationer af de eksisterende ressourcer. Dette er fremhævet, som afgørende for innovation i hans teori om at linke læring og innovation.

Bang m.fl. har en god pointe i at præcisere, hvorledes begreber fra forskning som såvel hypotese som forskningsspørgsmål og evaluering kan indarbejdes i design processen. De definerer design processen som eksperimentet, der fungerer som et centralt hjul, der driver processen. Deres definition af *"Entrance level"* underbygger ideen om at arbejde med indledende øvelser, der udfolder den overordnede vision eller *"the imagination"*. Bang m.fl. beskriver hypotesen som det indledende statement, hvorefter forskningsspørgsmål defineres værende mere specifikke.

Forholdet mellem begreberne forskningsspørgsmål og hypotese findes imidlertid beskrevet modsat flere steder i videnskaben, hvor forskningsspørgsmålet danner udgangspunkt for en mere detaljeret hypotese, der udtrykker en formodning om resultatet. Ifølge Frankel (2009) *"How to Design and Evaluate Research in Education"* defineres forskningsspørgsmål med fokus på, hvad der undersøges. Forskningsspørgsmål beskriver, hvorfor disse undersøgelser skal foretages og indkredser temaet mod at nå frem til, hvilke statements der skal testes, hvilket defineres i hypotesen. Hypotesen defineres altså på baggrund af forsknings spørgsmålet og eventuelt indledende analyser. Hypotesen har derved en mere præcis og snæver formodning af hvad udfaldet vil blive.

Hvor forskningsspørgsmålet kan være åbent, undrende og undersøgende, også i tværfaglig forstand, skal hypotesen kunne testes, som beskrevet nedenfor i citatet fra Berkeley. Derfor skal hypotesen relateres til bestemte metoder og forskningstraditioner:

"A hypothesis is a testable idea. Scientists do not set out to "prove" hypothesis, but to test them. Often multiple hypotheses are posed to explain Phenomena and the goal of research is to eliminate the incorrect ones." (<http://evolution.berkeley.edu> 09.09.13)

Entrance level, forskningsspørgsmål og hypotese relateret til EX Modellen

Forskningsspørgsmål og hypoteser er ikke beskrevet i de tre eksperimenter eller EX Modellen, hvor processen relateres til traditionelle design processer. Men vision, motivation og imagination i EX Modellen kan relateres til entrance level defineret af Bang m.fl. Her vil forskningsspørgsmålet kunne formuleres som et visionært forskningsspørgsmål (*the imaginative research question*) IRQ. Herved kunne forskningsspørgsmålet begynde med: *What if we imagine.....?* Jf. Schöns definitioner af de tre typer eksperimenter, hvor han understreger betydningen af "reflection in action" og the move-testing experiment, som bygger på en intention og en søgen gennem eksperimentet, der leder til en bedre forståelse for en given problemstilling. (Hansen, 2003)

Derved underbygges hensigten med de indledende øvelser indenfor kriterierne i eksperimentet. Disse kan bruges til at præcisere antagelser, hypoteser indenfor hvert kriterium. Disse hypoteser kan danne grundlag for efterprøvelse. De tre hypoteser vil derved kunne fokusere på de respektive emner, funktioner og de forskningsmæssige traditioner, der ligger bag de enkelte kriterier. Det vil således være muligt, at formulere hypoteser, der kan efterprøves indenfor forskellige metoder og forskningstraditioner, jf. Koskinen (2011). Derved kan forsknings baseret viden kommunikeres bredt men også specifikt indenfor forskellige videnskabelige traditioner gennem de enkelte kriterier.

Resume at linke forskning og design

Hvordan kan viden skabes i det arkitektoniske eksperiment ved at integrere metoder fra forskning i processen?

Definitionen af the lab, field og showroom kan beskrive potentialerne i, at evaluering af de tre kriterier kan relateres til forskellige forskningstraditioner som naturvidenskab, humaniora og design traditioner. Derved kan der arbejdes med forskellige fag og forskningstraditioner parallelt i eksperimentet og derved med forskellige tilgange til refleksioner gennem eksperimentet.

The "entrance level" understreger betydningen af trin 1, visionen. Her defineres IRQ – imaginative forskningsspørgsmål - der er brede, tværfaglige, visionære og imaginative. Disse kan gennem øvelser indenfor kriterierne præciseres til at definere mere specifikke hypoteser indenfor hvert kriterium, som kan danne grundlag for efterprøvelse via metoder fra forskellige forskningstraditioner.

PRAKSIS

- at linke humaniora og design

I dette afsnit diskuteres det, hvordan metoder og teorier fra humaniora kan understøtte en praksis- og brugerorienteret tilgang og skabe mulighed for validering af de kvalitative værdier i det arkitektoniske eksperiment.

For at undersøge dette tages der afsæt i teorier om *Practice og Habitus fra Bourdieu* (Wilken, 2011) og teorier om Practice Theory fra Schatzki og Gram-Hansen (2010). Fokus lægges på, at kunne stille de spørgsmål, der relateres til bruger praksis og ikke produktet. Denne tilgang kan inddrages i såvel design processen som ved evaluering/validering af den viden der udvikles i eksperimentet. Her diskuteres potentialet i at definere flere parametre, som tilsammen skaber et nuanceret billede af virkeligheden med reference til de fire elementer indenfor Practice Theory, som defineres af Gram-Hansen (2010). Derudover fremhæves værdien i at bruge verbet, for derved at underbygge en person orienteret tilgang, hvilket angår de personer, der indgår i design processen såvel som de personer, der påvirkes af designet.

Integration af metoder og viden fra humaniora i design processen er velkendt. F.eks. skriver Koskinen m.fl. (2011), at forskere gennem *constructive research design* processer henter inspiration fra ingeniørfaget såvel som fra humaniora og design traditioner – hvilket bringer design tilbage til kernen i forskning. På grund af metoder som scenarios, personas og cultural props fra humanistiske traditioner kan man ifølge Koskinen m. fl. føre mange aspekter i design praksis over i forsknings metoder.

“But to make validation on the qualitative user-centred values designers need tools from the humanities. The useful link between the fields is that the humanists have profession in understanding what exists and the designer in using this understanding to create a better future. Both approaches are important in designing sustainable buildings and components.”
(Koskinen, 2011)

Gennem de empiriske undersøgelser er det erfaret, at der i EX1 og EX2 ikke er inddraget metoder til at evaluere de kvalitative værdier i forskningsmæssigt regi. Begge eksperimenter er evalueret i forhold til de studerendes og andre projektdeltageres udtalelser om oplevelserne af at se og være i modellerne. Havde eksperimenterne været testet med test personer, eller andre tilgange og metoder, der udspringer fra en humanistisk tilgang, ville viden fra eksperimenterne i højere grad kunne valideres og dermed relateres til forskning, jf. Kapitel 3.

I EX3 er det erfaret, at der er stor værdi i at teste eksperimentet med testfamilier gennem observationer, interviews, dagbøger etc. forankret i antropologiske metoder. Det er også erfaret, at der i EX3 i design processen er potentialer i brugertilgangen gennem definition af personas. Ikke mindst i forbindelse med definering af fælles vision og målsætning i EX3 er brugertilgangen været værdifuld, idet scenariet om ”familien der har boet i huset i 10 år” finder værdi i, at huset ikke har taget mere end det har givet tilbage, får stor betydning for definition af projektets vision og senere målsætninger. Jf. Kapitel 3.

Test af energiforbrug og brugernes adfærd i et energioptimeret hus som EX3 har bevist at bruger inddragelse har stor indflydelse på energiforbruget. EX3 har efter en to årig testperiode demonstreret, at energiforbruget var meget højere end beregnet. Ifølge Velux skyldes 62% af forskellen mellem det målte og det beregnede, en anden brugeradfærd end forventet og forudsat i beregningerne. De bruger relaterede faktorer, der har betydning for afvigelserne i forhold til forudsatte beregninger er: højere gennemsnitstemperatur end forventet, manuel overstyring af solafskærmning, større forbrug af varmt vand, lavere intern varmelast og ikke mindst manglende forståelse for styringsystemet og anden teknologi. (Hansen, 2013)

I samme artikel er det argumenteret, at bruger tilgangen er værdifuld i forhold til at definere og integrere de kvalitative elementer i design processen parallelt med de kvalitative værdier. Den store divergens i forventet forbrug i forhold til det faktiske forbrug, grundet anden brugeradfærd, taler for værdien i en bedre forståelse for brugernes interaktion med energi optimeret teknologi og arkitektur. Derfor er bruger aspektet vigtigt at indarbejde ikke bare i test af bygningen i drift som i practice theory men ikke mindst i processen, hvor bygningen designes.

Practice Theory

Den franske sociolog Pierre Bourdieu formidler teorier om praksis gennem hans udgivelser af "Outline of a theory of Practice"(1972/1977) og "The logic of Practice"(1980/1990). Disse følges op af filosofen Theodor Schatzki i 2001 med hvad han kalder "The practice turn", hvilket danner afsæt for den danske forsker Kirsten Gram-Hansens definition fra 2010 af fire elementer til at bygge bro mellem kvalitative og kvantitative værdier og traditioner. Gram-Hansens (2010) fire elementer indenfor Practice Theory kan relateres til tilgangen i det arkitektoniske eksperiment, hvilket vil blive udfoldet i dette afsnit.

Bourdieu er central for diskussioner af forskningsmetoder og vidensproduktion på tværs af fag. Bourdieu forsøger at linke de bløde og hårde samfundsvidenskaber ved at bygge bro mellem objektivisme og subjektivisme. Susanne Wilken beskriver, at der både i filosofien og i samfundsvidenskaberne findes en fundamental modsætning mellem objektivisme og subjektivisme. Enten henvises til underliggende strukturer, eller også forklares det med henvisning til rationelt funderede handlinger; enten formuleres abstrakt teori eller også fortæbes handlingerne i empiri; enten laves kvantitativ forskning eller også laves kvalitative undersøgelser. Med denne opsplitning overser man ifølge Bourdieu, at begge tilgange rummer vigtige brikker til forståelsen af, hvordan socialt liv produceres og reproduceres og hvordan det kan være, at mennesker handler som de gør. (Wilken, 2011, p.43).

Denne tilgang er relevant i forhold til den proces, der sker i det arkitektoniske eksperiment, da der også her inddrages viden på tværs af fag, der er funderet i de kvalitative eller kvantitative værdier. Der er også i eksperimentet et ønske om at forene disse tilgange, for at skabe et fundament bygget på forståelse for hvordan design og arkitektur påvirker praksis såvel som miljøet. Indenfor det arkitektoniske eksperiment er det primært metoder, der beskriver det fysiske og metoder der beskriver det oplevede, som skal forenes. Det er f.eks. hensigten i EX2, ved at definere værdierne det regulerende og det kommunikerende.

I sin analyse af praksis bruger Bourdieu bl.a. begrebet "Habitus", som middel til at bygge bro mellem to modsatrettede traditioner i samfundsvidenskabelig tænkning, subjektivisme og objektivisme. Bourdieus mener, at vaner grundlæggende er kropsligt forankret.

"Den kropslige forankring af habitus betyder, at det sociale er indlejret i kroppen, og det har betydning for både erindring og for handling. På den ene side betyder det, at mennesker i mindst lige så høj grad husker med kroppen som med hovedet. Udtrykket "rygmarvsviden" er meget rammende, fordi det netop implicerer, at kulturelle normer, fx for hvordan man står, sidder og taler i forskellige situationer, er indlejret i kroppen og derved uden for bevidsthedens greb" (Wilken, 2012, p.48)

Hvis viden om og forståelse af det sociale i mindst lige så høj grad er kropslig som mentalt, så kan man ikke nøjes med at basere sin analyse af det sociale på fortællinger – hvad enten fortællingerne stammer fra mundtlige eller skriftlige kilder. I Bourdieus analyser indgår derfor både fortællinger og observationer i rekonstruktionen af habitus. (Wilken, 2012)

Her kan der drages parallel til, at arkitektur ikke kun kan beskrives eller skabes gennem tegninger, ord eller beregninger. Det er her det arkitektoniske eksperiment kommer i spil, idet det netop er muligt gennem modellen at skabe rum for at fremkalde "erindring, oplevelse og vurdering gennem kroppen" som formuleret i teksten ovenfor. Specielt er de rumstore modeller egnede til at linke det Bourdieu kalder det selvbevidste teoretiske gennem de kropslige, mentale oplevelser af modellen. Men når det kommer til traditionen indenfor arkitektur kommer vi til kort, når disse værdier skal evalueres og valideres i forskningsregi, og det er her, teorier som Bourdieus *Habitus* kan have potentialer, for at bliver overført til det arkitektoniske eksperiment.

Bourdieu teori om praksis relateres til det filosofen Theodor Schatzki (2001) kalder "the practice turn" i samfundsvidenskaberne, den kan forstås som en reaktion mod funktionalismens og strukturalismens systemtænkning. "Praksis-vendingen" repræsenterer forsøg på at "genindføre handlende agenter" i analyser af det sociale uden at miste blikket for betydningen af sociale strukturer. (Wilken, 2012)

"Bourdieu begreber er tænkeredskaber, der skal bruges i empiriske analyser. Begreberne udstikker således rammerne for, hvad man skal kigge efter, når man vil undersøge og forklare sociale problemstillinger." (Wilken, 2012, p.40)

Her kan der drages reference til de tre eksperimenter. Når der i disse defineres begreber og matrix er det også for at udstikke rammerne for at stille spørgsmål, der linker det kvalitative og det kvantitative, disse kan betegnes tænkeredskaber.

Kirsten Gram-Hansen knytter de bruger centrerede aspekter fra practice theory med praksis undersøgelse i det byggede miljø. Gram-Hansen definerer *practice theory* som:

"a fragmented body of theories that embraces questions about what role things and technologies should have in the understanding of practices". (Gram-Hansen, 2010, p.176)

For at sammenholde denne kompleksitet identificerer og definerer Schatzki tre elementer: *“Practical understanding, Rules and Teleoaffective”*. Gram-Hansen bidrager til practice theory ved at addere endnu et element *“Technology and product”*, med reference til Reckwitz, Shove and Pantzar:

Gram-Hansens(2010, p.177) fire elementer:

1. Practical understanding, embodied habits, know-how

About knowing what to do, and knowing how to identify and react to something. Relates to Bourdieu's “habitus”. The users embodied habits.

2. Rules, knowledge, language

Rules, knowledge and language gained from institutions, television, newspapers etc.

3. Engagement, meanings

Meaning that the practitioners are engaged and meaning accumulates through their actions. Affective, being goal oriented, where the goal is directed by normative views or moods.

4. Products, product element, “things”, technologies.

Concept of “things” and technologies, the material elements determining a certain practice, one approach, material structures as enabling and constraining certain practices.

Gram-Hansen(2010) tester de fire elementer for hvordan de kan strukturere kvalitative og kvantitative data fra varmemeforbruget i fem ens familieboliger og konkluderer at tidligere har nogle studier fokuseret på teknologier, andre på videnskab eller bruger teori eller vaner osv. I practice theory er alle disse bragt sammen gennem de fire forskellige elementer i at holde praksis sammen Dette er en enkel systematik for empirisk analyse, der kombinerer de forskellige elementer, der er relevante i forståelsen af praksis.

Practice theory i relation til det arkitektoniske eksperiment

Practice theory er interessant i forhold til at skabe en ny tilgang til beskrivelse af samspillet mellem arkitekturen og praksis med fokus på mødet mellem arkitekturen og brugerne i praksis. Gram-Hansens fire elementer beskriver kriterier, der normalt ikke integreres ved skabelsen af arkitektur.

I de tre eksperimenter er der i lighed med practice theory tilgangen arbejdet med at definere elementer (kriterier), der tilsammen definerer en praksis i en større sammenhæng. Kriterierne kan diskuteres på tværs af forskellige discipliner med kvalitative og kvantitative tilgange i design processen og anvendes til evaluering.

Der er en grundlæggende forskel i måden evalueringens kriterier defineres indenfor eksperimenterne og beskrivelsen af elementerne i practice theory. Det kan illustreres gennem EX3, hvor der i artiklen *“The Window – a poetic Device and Technical Tool..”* [10] er beskrevet *“objectives and approaches referring to the active house parameters”*. Tre udvalgte eksempler på evaluering og design parametre er: *“Choosing materials that have minimum impact on the environment”, “Optimized daylight conditions with large window area distributed round all four facades” Meeting the energy demands of 2020 building regulations”*.

Ovenstående parametre tager afsæt i materialerne, dagslysforhold og bygningsreglementet, hvorimod de fire elementer i practice theory tager afsæt i brugeren, hvilket kan illustreres gennem fremhævelse af verbet. Verberne i Gram-Hansens definitionen af de fire elementer "*knowing, do, identify, react, gained, engaged, meaning accumulating, enabling, constraining*", illustrerer et stærkt link til bruger tilgang, praksis og kontekst.

Det faktum, at bygningen ikke er en genstand eller et mål i sig selv, og det faktum, at arkitektoniske oplevelser, relationer og handlinger er vigtigere, end fysiske objekter eller visuelle enheder er beskrevet af Pallasmaa, der beskriver dette ved at understrege betydningen af verbet i arkitekturen. For at illustrere dette er verberne i Pallasmaas citat nedenfor understreget:

"Architectural images are promises and invitations: the floor is an invitation to stand up, establish stability and act, the door invites us to enter and pass through, the window look out and see,.... Consequently, the basic architectural experience have the essence of verbs rather than nouns..."the act of entering or crossing the boundary between two spatial realms, not the appreciation of the visual image of the door: looking out of the window and being reconnected with the outside, rather than the window itself as a unit of visual design. The quality of a window lies in the manner in which it elaborates and expresses its "windowness", how it mediates between outsideness and insideness, frames and scales view, articulates light and privacy, and how it invigorates the room and gives it its special scale, rhythm and ambience. Architecture turns space into place. It directs our attention away from itself; the window reveals the beauty of the courtyard and the tree outside, or it focuses on the distant silhouette of a mountain." (Pallasmaa 2011, pp. 123-124)

I det følgende omdefineres de fire elementer fra Practice Theory, til spørgsmål relateret til praksis og ikke et spørgsmål som det typisk vil lyde i design regi relateret til produktet eller teknologien. Disse spørgsmål kan typisk være en del af de spørgsmål, der knytter sig til hypoteser indenfor de tre kriterier i det arkitektoniske eksperiment.

1. Practical understanding, embodied habits, know-how

About knowing what to do, and knowing how to identify and react to something. Relates to Bourdieu's "habitus". The users embodied habits.

Q1: How can the experiment (component/architecture) guide the user to know how to do, identify and react in a better way, maybe influence the habit?

NOT how is the user expected to use the experiment and if the experiment is not performing as expected it is caused of the user doing something wrong!

NOT how can the design meet practice.

2. Rules, knowledge, language

Rules, knowledge and language gained from institutions, television, newspapers etc.

External influence. Something to be aware of in the design process but not something the design can effect but it can be meet in the program.

Q2: How can the experiment meet the way the rules influence the user?

NOT how can the experimnet meet the roles

3. Engagement, meanings

Meaning that the practitioners are *engaged* and meaning accumulates through their actions. Affective, being *goal oriented*, where the goal is directed by normative views or moods.

Q3: How is the user *engaged* and how does the user *accumulate* meaning through action?

NOT How does the experiment create meaning.

4. Products, product element, "things", technologies.

Concept of "things" and technologies, the material elements determining a certain practice, one approach, material structures as *enabling and constraining* certain practices.

Q4: How does products, "things" and technologies *enable* and *constrain* certain practices?

NOT How does the "things" and technique work?

Element 1. *Practical understanding, embodied habits, know-how.* I et bæredygtighedsperspektiv er der især potentialer i at vægte element 1. *Practical understanding, embodied habits, know-how* i det arkitektoniske eksperiment. En praksis tilgang til vaner og know-how kan skabe forståelse for, hvordan designet kan motiverer at praksis underbygger bæredygtige vaner. Dette element kunne med fordel integreres som kriterium i design processen for det arkitektoniske eksperiment.

Element 2. *Rules, knowledge, language* har stor betydning i forhold til at informere gennem manualer, specifikationer og andre offentlige kilder, hvilket er særlig aktuelt i et bæredygtighedsperspektiv, hvor der formuleres standarder, specifikationer og reglementer med regler og nye sprog for hvilke krav der skal efterleves. Der ligger en stor udfordring i at forstå, hvordan disse informationer modtages og benyttes af brugerne frem for at designe mod at efterleve et krav baseret på en beregning, hvor brugernes vaner og information ikke er en forudsætning. I EX3 er det illustreret, at en målsætning om at efterleve 2020 bygningsreglementer ikke skaber stor effekt hos brugerne. Men en oversættelse til kriterier, der er motiverende, kunne med fordel formuleres og integreres i deres hverdag gennem synlighed af forbrug og produktion af energi, og disse kunne med fordel relateres til reglementer.

Element 3. *Engagement, meanings* kan skabe stor effekt, idet det er almindeligt kendt, at bruger adfærd påvirkes gennem motivation. Som det er erfaret i EX3, har det stor effekt, at testfamilierne kan se deres forbrug og skabe motiverende målsætninger om ikke at forbruge mere end de producerer. I EX3 funderes denne motivation og engagement i den overordnede vision om at bo i et hus, der ikke tager mere end det giver tilbage. Denne tilgang, er som tidligere nævnt, defineret med afsæt i bruger udsagn.

Element 4. *Products, product element, "things", technologies.* Er relevant i design processen i forhold til, hvordan de fysiske ting påvirker og aktiverer handlinger i praksis. Element 4. kan med fordel udvikles og testes gennem trin 4 i det arkitektoniske eksperiment, *Construction*, da det her er muligt at vurdere disse fysiske elementer tæt på praksis.

Ovenstående fire elementer er svære at integrere som parametre i design processen, da det er vanskeligt at oversætte disse til form eller virkemidler. Men det ville være af stor værdi i et bæredygtighedsaspekt, at brugernes praksis integreres, for ikke at sige en forudsætning for at nå de ambitiøse mål, der er sat for fremtidens byggeri. En metode til at tilegne sig viden om bruger praksis ville være at inddrage elementer fra *practice theory* i evalueringen

og derigennem tilegne sig viden om vaner, habitus og praktisk forståelse for designet samt sammenhængen med virkemidler. Kendes forskellige virkemidler kan disse føres tilbage til nye eksperimenter og integreres som design elementer.

Resume – en humanistisk tilgang

Hvordan kan metoder og teorier fra humaniora understøtte en praksis og bruger orienteret tilgang samt skabe større validering i det arkitektoniske eksperiment?

Gram-Hansens tilgang til *practice theory* og *habitus*, med at definere de fire elementer for at skabe en bedre forståelse af praksis, kan sammenstilles med, at der i det arkitektoniske eksperiment forsøges at skabe en bredere forståelse for praksis ved sammenstilling af forskellige teorier og metoder i processen. Sammenstillingen af de fire elementer i *practice theory* er således motiverende for den sammenstilling af kriterier, der foretages i det arkitektoniske eksperiment. I begge tilfælde for at skabe en forståelse, der relaterer sig til praksis. *Practice theory* kan motivere til, at der i det arkitektoniske eksperiment integreres spørgsmål, der knytter sig til mødet mellem arkitekturen samt teknologien og brugeren i praksis. Det kan ske ved at benytte verbet, som det er tilfældet i beskrivelsen af de fire elementer i *Practice theory*. Derved beskrives tilgangen til praksis frem for tilgangen i eksperimenterne og de fysiske elementer, der ofte tager afsæt i, hvordan produktet eller teknologien performer. I det arkitektoniske eksperiment kan verbet benyttes til beskrivelse af de *imaginative research questions* og hypoteser, og derved skabe afsæt i brugeren og praksis i stedet for at omhandle produktet.

I evalueringen af eksperimentet vil elementerne fra *practice theory* især være relevante, da det specielt i et bæredygtighedsperspektiv er vigtigt at forstå at designe - ikke for at efterleve beregninger og forudsætninger, men med afsæt i hvordan designet kan understøtte en bæredygtig adfærd i praksis.

RESUME AF TEORI OM INNOVATION, DESIGN RESEARCH OG PRAKSIS

I kapitlet er det afsøgt, hvordan forsknings baseret viden kan genereres gennem det arkitektoniske eksperiment.

Via teorier indenfor innovative processer er modellen for det arkitektoniske eksperiment understøttet gennem præcisering af de fire trin samt ved tilføjelse af en pil, der indikerer at viden udviklet i eksperimentet føres tilbage.

Teorier indenfor design har fremhævet værdien i at arbejde med de tre kriterier i det arkitektoniske eksperiment. De tre kriterier kan evalueres indenfor forskellige forskningstraditioner og derved kan naturvidenskabelige, humanistiske og kunstneriske metoder inddrages i det samme eksperiment. Derudover er det argumenteret, hvordan innovative forskningsspørgsmål og hypoteser indenfor de tre kriterier kan integreres i modellen for det arkitektoniske eksperiment.

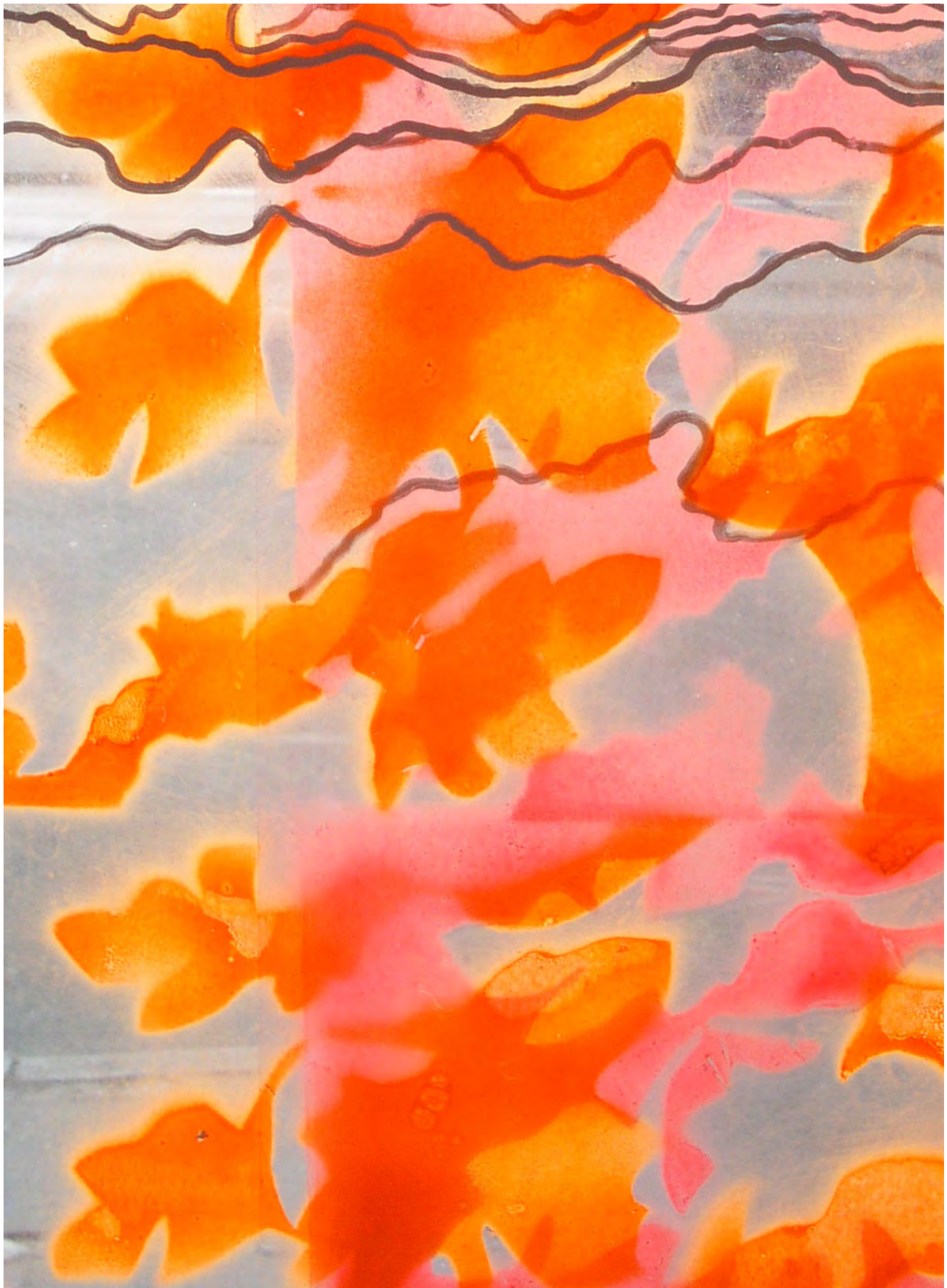
Endelig har teorier fra en humanistisk tilgang understøttet betydningen i bruger praksis ved at fokusere på hvilken interaktion der kan skabes mellem brugeren og designet. Det integreres i processen ved at definere forskningsspørgsmål og hypoteser, der relateres til bruger praksis ved brug af verbet.

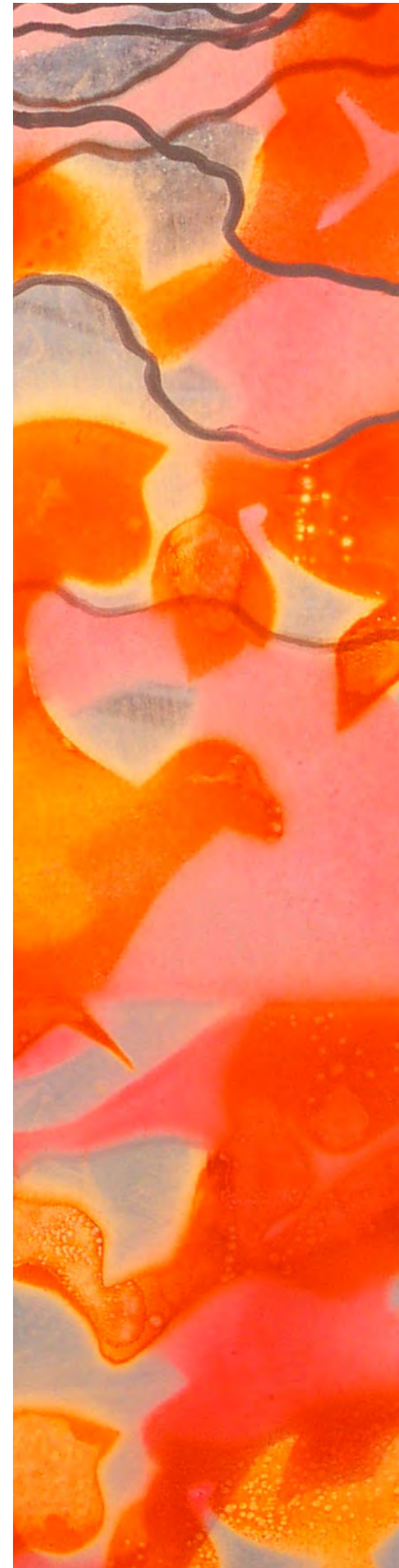
Nedenstående matrix sammenstiller begreber, trin og metoder fra teorierne med principperne indenfor modellen for det arkitektoniske eksperiment. Som det fremgår af denne matrix er der mange sammenfald, hvor principperne i proces modellen beskrives med teoretisk afsæt på forskellige måder.

I næste kapitel konkluderes erfaringerne fra empirien og teorien med en perspektivering. Dette illustreres gennem en generel proces model for det arkitektoniske eksperiment.

	INNOVATIVE PROCESSES		DESIGN RESEARCH	PRACTICE THEORY	
Principles in EX Model	Carfile Knowledge boundaries Boundary objects	Hargadon Knowledge Brokering	Bang Experiment Entrance level	Koskinen Design Research	Bpurdieu, Gram-Hansen Habitus, Practice Theory Practice of the user
Collaboration combining fields, research and practice (trust)	4. iterative approach	1. Access Preconditions For innovation New combinations	Entrance level motivation	The lab, field and showroom, Different research cultures meet	Bringing different theories together Objectivism and subjectivism
1.Vision, IRQ motivation cross boundaries related to end user	1. Transfer Syntactic	1. Access	Entrance level - motivation to RQ	From the design tradition	3. engagement, meanings Use verbs related to end users practice
2.Criteria different fields, functions and cultures Hypothesis	1. Transfer Syntactic	2. Access to multiple domains	Leads to hypothesis within each criteria	Criteria represent BOTH lab, field and showroom	The four elements from different aspects
Exercises and concepts communicating and exploring	2. Translate Semantic	3. Learn, gain knowledge of existing	Leads to hypothesis within each criteria	in BOTH lab, field and showroom	
3. Construction exploring/designing synthetizing	3. Transfor- mation Pragmatic	4. Link, recognize share	Testing hypothesis	Showroom/ Field	Field work 1. practical understanding 4. Products, technologies
4. Evaluation Validation Communication		5. Build innovations	Evaluation of hypothesis New research based knowledge	In BOTH lab, field and showroom	4 practice elements user related by using verbs

Fig. 4.6: Matrix der sammenstiller teorier fra innovative processer, design research og practice theory med de fire principper, der indgår i modellerne for de tre eksperimenter jf. Kapitel 3.





5. KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING

Hvad med at designe med lys - sammen?

5. KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING

Hvad med at designe med lys – sammen?

I dette kapitel sammenfattes svarene på de spørgsmål, der er stillet i afhandlingens tre tidligere kapitler, repræsenterende temaerne:

1. Diskussion af lys som design-element i et bæredygtigt perspektiv
2. De tre eksperimenter systematiseret gennem proces modeller
3. Teori reflekteret i de tre eksperimenter.

Svarene sammenfattes i den generelle proces model for arkitektoniske eksperimenter. Dernæst foretages en refleksion over de metodiske tilgange benyttet i afhandlingen. Endelig opridses gennem en perspektivering mulighederne i at benytte og videreudvikle afhandlingens resultater. Spørgsmålene i de tre kapitler er besvaret nedenfor. (Spørgsmålene er markeret med *kursiv*.)

1. Diskussion af lys som design-element i et bæredygtigt perspektiv.

For en præcisering af afhandlingens tema er det diskuteret indledningsvis, *hvordan lys som design element har været brugt i arkitekturen*. Det konkluderes, at lys siden antikken har været brugt som design element, der tager afsæt i både kvalitative og kvantitative tilgange såvel som teoretiske og praktiske metoder på tværs af fag. Arkitekter og lysdesignere har udviklet metoder og begreber til at beskrive lysets mange værdier. Men der er ikke arbejdet direkte med, hvordan lysets værdier kan defineres i transdisciplinære teams og derved motiverer en kreativ design proces og samtidig generere ny viden. Specielt ved inddragelse af viden om lys i et bæredygtigheds perspektiv er der potentialer i at arbejde med lyset som et *"multidimensional design element"* i *"transdisciplinære teams"*.

2. De tre eksperimenter systematiseret gennem proces modeller.

De tre eksperimenter, der udgør empirien, demonstrerer tre forskellige eksempler på, *hvordan viden om lys fra forskellige discipliner motiverer en design proces*. Lyset er i alle tre eksperimenter defineret indenfor tre forskellige fokus- og vidensområder (*criteria*), som syntetiseres gennem tre trin i processen, (*vision, construction og evaluation*). Hvert eksperiment illustreres gennem en proces model. Alle tre eksperimenter demonstrerer, at der fremkaldes nye arkitektoniske potentialer i design processen, ved at tilføje viden om lys fra forskellige fagområder.

De tre eksperimenter demonstrerer også, *hvilken ny viden der genereres i de tre processer*. Processerne bygger på videns tilførsel og transformation på tværs af faglige kulturer. Af den systematiske beskrivelse af eksperimenterne fremgår det, at processen i de tre eksperimenter udvikles iterativt. Det fremgår også, at de tre eksperimenter udgør tre forskellige typer eksperimenter, hvor samarbejdsformen og den viden, der hentes ud af eksperimentet er forskellig. Eksperiment 3, "Bolig for livet", (EX3), er gennemført i transdisciplinære teams. Her tilføjes viden fra parter repræsenterende forskellige fagområder og denne viden transformeres af parterne til ny viden, der ikke er forankret i ét fag men rettet mod et svar på en vision. Det viser sig også, at de tre eksperimenter kan defineres indenfor forskellige experi-

menttyper. EX3 kan betegnes som et *hypothesis testing experiment*, hvilket indikerer at den ny viden, der genereres gennem eksperimentet, er valideret gennem evalueringer. Derved udvikles der i EX3 generaliserbar viden og således viden der er værdifuld i et bæredygtigheds perspektiv, idet generaliseret og eksplicit viden kan overføres til nye eksperimenter og derved understøtte udviklingen.

Det er observeret, at meget af den viden, der blev genereret i eksperimenterne, stadig forbliver tavs. Det er også observeret, at konstruktionerne/modellerne er svære at evaluere, idet der ikke er formuleret forskningsspørgsmål eller hypoteser, der kan testes gennem modellen og styrke andelen af eksplicit viden udviklet i processen. Endelig er det observeret, at der ligger et potentiale i at fokusere på slutbrugeren i processen.

3. Teori reflekteret i de tre eksperimenter.

Det er illustreret, hvordan teorier fra *ingeniørvidenskab, innovation, design og humaniora kan bidrage til at der udvikles ny viden i det arkitektoniske eksperiment.*

Ved sammenstilling af proces modellen fra empirien med innovations teorier, er det illustreret, at de tre *criteria*, der repræsenterer tre forskellige faglige tilgange i eksperimenterne, kan repræsentere de forskellige typer viden, der i innovations teorierne refereres til som grundlæggende for at skabe innovation. Det understreges i teorierne, at viden fra de forskellige faglige discipliner skal oversættes og transformeres på tværs af de faglige grænser. Dette finder også sted i de tre tværgående trin i Modellen for arkitektoniske eksperimenter, *vision, construction og evaluation*. Specielt fremhæves i teorien værdien i at syntetisere viden gennem design af modeller mv.

Innovationsteorierne fremhæver således værdien i, at viden skal føres tilbage til de netværk, der føder ind til processen. Dette aspekt tilføjes via en pil i proces modellen for det arkitektoniske eksperiment. Denne tilbageførsel af viden til bagvedliggende netværk kræver, at viden er eksplicit og baseret på en forskningsmetodik, der skaber objektivitet og transparens i, hvordan spørgsmål og antagelser er undersøgt og evalueret. Teorier relateret til forskning indenfor design har bidraget til, at elementer fra disse teorier indarbejdes i modellen for det arkitektoniske eksperiment. Der argumenteres for, hvordan imaginative forskningsspørgsmål kan relateres til visionen i trin 1, ved at definere spørgsmålet som: "What if we imagine...".

For at understøtte problemområdet vedrørende arbejdet i et tværfagligt miljø demonstrerer de tre eksperimenter og de understøttende teorier, at forskning fra forskellige traditioner kan integreres i de individuelle kriterier i projekterne. Således er det muligt i den samme proces, at arbejde med hypoteser, der testes parallelt i de tre kriterier med baggrund i teknisk/naturvidenskabelig, samfundsvidenskabelig og kunstnerisk/humanistisk forskningstradition.

Endelig er en humanistisk tilgang inddraget ved at tage afsæt i bruger-praksis og definering af fire elementer for at skabe en reference til praksis. Disse fire elementer kan relateres til ideen med at arbejde med tre kriterier for ligeledes at skabe en sammenhæng med praksis. Det er demonstreret, at der er en værdi i at benytte verber til definition af "imaginative" forskningsspørgsmål (IRQ) og hypoteser, for derved at skabe fokus på effekten af interaktionen mellem design, brugere og kontekst og ikke kun designet som fysisk objekt.

MODEL FOR ARKITEKTONISKE EKSPERIMENTER

Nedenstående proces-model for det arkitektoniske eksperiment sammenfatter erfaringerne fra empirien og teorien. Modellen er et svar på afhandlingens hovedspørgsmål: "Hvordan kan viden om lys fra forskellige fagområder motivere en kreativ designproces og generere ny viden?"

Modellen består af fem trin:

Trin 1. "IMAGINE AND ASK" (transfer)

Modellen illustrerer, hvordan viden fra forskellige fagområder inddrages i design fasens "entrance level". Her skabes en fælles forestilling om, hvordan eksperimentet kan bidrage med design og viden, der er meningsfuld for alle parter i projektet, ved at tage et visionært brugerperspektiv. Dette tværgående trin kaldes "imagination" og outputtet er et forskningsspørgsmål, det imaginative research question (IRQ), der udtrykker en fælles visionær vilje til at skabe værdi gennem eksperimentet. Verbet benyttes til at sætte fokus på brugerrespektet.

Trin 2. "EXPLORE AND PROPOSE" (translate)

Til udfoldelse af forskningsspørgsmålet defineres tre criteria, der repræsenterer viden indenfor forskellige faglige kulturer og funktioner. Disse criteria udforskes og oversættes til et fælles sprog, der kommunikeres i modeller, skitser, billeder, diagrammer, begreber, matrix m.v. Outputtet er en formodning, der formuleres gennem en hypotese indenfor hvert *criteria*. Disse underbygger forskningsspørgsmålet.

Trin 3. "LINK AND CONSTRUCT" (transform)

Viden linkes på tværs af criteria gennem konstruktion af modeller (construction). De tre *criteria* vægtes indenfor virkemidler og design løsninger og sammenfattes i modeller, der udgør outputtet af trin 3 og det produkt, der evalueres i forhold til hypoteserne.

Trin 4. "TEST AND EXPLAIN"

Her testes "construction" via hypoteserne indenfor de tre criteria. Metoder relateres til forskellige forskningstraditioner. Resultaterne af valideringen af hypoteser sammenstilles og det forklares, hvordan criteria individuelt og tilsammen besvarer det "imaginative" spørgsmål. Denne viden er design baseret forskning og forsknings baseret design og kan formidles isoleret indenfor de enkelte criteria og den pågældende forskningstradition eller sammen gennem eksperimentet som helhed.

Trin 5. "SHARE AND LEARN"

Viden deles ved at kommunikere indenfor de enkelte criteria såvel som på tværs af de tre criteria. Samtidig er det muligt at kommunikere gennem hele designet, som en fortælling om eksperimentets proces og resultat i et helheds perspektiv. Denne viden kan derved føres tilbage som eksplicit viden til specialiserede netværk bag partnerne i projektet samt kommunikeres eksternt til såvel brugere som praktikere og teoretikere.

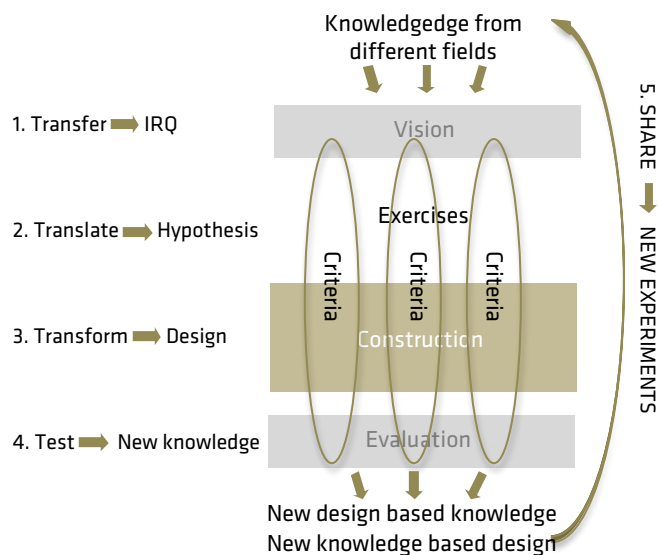


Fig. 5.1 Model for det arkitektoniske eksperiment

METODE REFLEKSION

Den induktive metode har i denne afhandling fungeret efter hensigten. Erfaringer om design processen fra empirien er blevet systematiseret i eksplicite principper og modeller samt underbygget og udbygget i en teoretisk sammenhæng mod en generel proces model for arkitektoniske eksperimenter. Den tavse viden fra udvikling og gennemførelse af de tre eksperimenter er derved blevet eksplicit og kan kommunikeres og anvendes i en bredere sammenhæng.

Fordelen ved den forskningsmetodiske tilgang i denne afhandling er, at mange års erfaring og deraf afledte formodninger, kan inddrages og derved bidrage til projektet med et relativt stort empirisk materiale. Til gengæld skal problemstillingen baseres på denne empiri og kan derved ikke formuleres frit.

Metoden anvendt i denne afhandling kan motivere til, at der udvikles mere forskningsbaseret viden på baggrund af allerede indhentet erfaring fra praksis og derved mulighed for at føre denne viden tilbage til praksis. Hvilket skaber praksis relateret forskning, der især kan bidrage til at linke erfaringer mellem teori og praksis indenfor vores byggede miljø. Specielt i perspektivet af en bæredygtig udvikling er det en nødvendighed, at erfaringer fra praksis kan opsamles, systematiseres og generaliseres, hvilket ifølge Schön vil være reflection-on-action (Hansen, 2003). Denne viden kan anvendes i praksis, der igen kan føde ind til forskningen. Derved underbygger metoden benyttet i denne afhandling den iterative proces, der skal understøtte relationen mellem forskning og praksis. Ideen om at skabe praksis-baseret forskning og forsknings-baseret praksis.

Metoden benyttet i afhandlingen linker udover teori og praksis også de kunstneriske/humanistiske, samfundsvidenskabelige og teknisk videnskabelige discipliner i processen. Eksperimenterne i empirien har en kunstnerisk tilgang, der søger at integrere teknisk naturvidenskabelige elementer. Den teoretiske tilgang tilføjer herudover teorier, der har traditioner forankret i humanistiske, naturvidenskabelige og tekniske traditioner. De forskellige tilgange understøtter diskussionen om, at skabe værdi gennem eksperimentet med en transdisciplinær tilgang, der understøttes af, at der kan argumenteres med afsæt i observationer og teorier på tværs af faglige kulturer.

PERSPEKTIVERING

Afhandlingens resultat, kommunikeret gennem proces modellen, er her udviklet og diskuteret på et overordnet teoretisk plan, der kan bidrage til en generel diskussion. Modellen kan anvendes til kommunikation om mulighederne generelt i at designe med viden på tværs af fag og kulturer og om at udvikle viden gennem design.

Det arkitektoniske eksperiment i praksis

Det åbner for potentialer for at definere projekter, der videreudvikler og anvendeliggør modellen ved at definere konkrete metoder, redskaber og output. Det kan ske ved at studere allerede gennemførte processer fra udvalgte innovative cases fra praksis og relatere og evaluere disse i forhold til proces modellen, *reflection-on action*. Eller ved at definere nye projekter, hvor processen gennemføres og skaber afkast i form af konkrete metoder, redskaber og output integreret i proces modellen, *reflection-in-action*.

Empirien fra afhandlingen er projekter, der er gennemført i forsknings-, undervisnings- og udviklingsregi. Et forskningsprojekt, der er forankret i praksis i traditionel regi på f.eks. en tegnestue, vil skabe viden om, hvordan processen gennemføres rationelt, tidseffektivt og med de konflikter, der opstår i et sådant miljø.

Konkrete indsatsområder kan være at definere og analysere metoder, redskaber og output i de fire trin i den teoretiske proces model for arkitektoniske eksperimenter. Dette kan gøres ved at referere til Carlile's begreber objects and ends beskrevet kort i kapitel 4. i afsnittet "Teori om *knowledge boundaries* reflekteret i EX Modellen". "*Objects*" refererer til de redskaber, der inddrages af de forskellige projektpartnere i processen. "*Ends*" definerer det målbare output, der kommer ud af designet. I det arkitektoniske eksperiment kan objects være redskaber og metoder brugt i design processen og ends kan beskrives som test af hypoteserne og andre output. Herved kan der defineres en mere anvendelsesorienteret "værktøjskasse" med eksempler på redskaber, der vælges med sans for at indfri behov indenfor det enkelte criteria og med sans for helheden. Såvel som output relateres til den overordnede "imagination".

Specielt ligger der et potentiale i at definere, hvordan teknologiske redskaber inddrages. Det bør undersøges, hvordan viden om lyset udfoldes gennem øvelserne såvel som gennem konstruktionen samt hvordan lysets effekter og affekter kan understøttes af en interaktion mellem fysiske og virtuelle modeller. Desuden kan beregninger og målinger af lyset med fordel systematiseres og gennemføres digitalt.

En konkretisering af metoderne vil illustrere, hvordan viden om lys fra forskellige faglige miljøer kan inddrages, udvikles og transformeres sammen. Her vil det være muligt at pege på konkrete metoder til kvalitative og kvantitative værdisætning af lys gennem digitale og analoge redskaber.

Ny og fremtidig lovgivning og specificeringer om energiforbrug, dagslysforhold, miljøpåvirkning og indeklima kan inddrages for en diskussion og anbefaling til, hvordan disse krav integreres i processen med en multidimensional tilgang. Ikke mindst for at bidrage til, at denne type lovgivning kan formuleres med en multidimensional tilgang, der skaber mulighed for at fremstille mål, der kan udvikles og inddrages som kriterier i den kreative proces.

Det arkitektoniske eksperiment og undervisning

Endelig vil modellen kunne relateres til undervisning, idet læring gennem design som ved "Problem Based Learning", er det pædagogiske fundament på Aalborg Universitet udmøntet gennem den såkaldte "Aalborg Model". Her arbejdes der med, hvordan viden fra forskellige fagområder tilføres gennem koncentrerede kursusforløb og syntetiseres gennem projektføløb. På et institut som "Arkitektur og Medieteknologi" foregår dette i høj grad gennem kreative vidensbaserede designprocesser. Der er mulighed for at relatere modellen til de processer der pt. benyttes og udvikles generelt indenfor videregående uddannelser og specielt på Institut for Arkitektur og Medieteknologi. Disse processer bygger på begreber som "learning through design", ligesom tankerne bag "d.school" og "design thinking" kan relateres til modellen.

Konkret kan afhandlingens resultater med fordel videreudvikles indenfor de mange tværfaglige uddannelser, der i disse år udvikles og gennemføres på nationale og internationale universiteter. I den Internationale tværfaglige masteruddannelse Lighting Design, der påbegyndes efteråret 2014 på Aalborg Universitet, er studieplanen bygget op omkring tre faglige tilgange og traditioner nemlig medieteknologi, arkitektur og lys teknologi. Viden fra disse fag tilføres de studerende gennem kurser indenfor hvert fag og syntetiseres i semesterprojekterne gennem design projekter som eksperimenter. Her vil modellen kunne benyttes til udvikling af strategier for, hvordan man designer med viden om lys med afsæt i de tre fagområder (*Criteria*) og hvordan denne viden transporteres, oversættes og transformeres i design processen – det arkitektoniske eksperiment.

Hvad med at designe med lys – sammen?

Lysets potentialer er utallige – det gælder også metoder til at fremkalde dem. Her er der udviklet en model, der beskriver, hvordan vi sammen kan fremkalde og syntetisere de multidimensionale værdier i lys gennem eksperimentet.

Modellen er tænkt som rammen der skal motivere en bæredygtig udvikling til at designe med lys - sammen. Den er tænkt som et dynamisk redskab, hvor rammerne kan moduleres og udvikles og sprænges. Vel vidende at kreativitet og innovation ikke kan sættes på formler eller i modeller, så er hensigten, at modellen kan systematisere på et niveau, hvor der skabes rum for uforudsigelige løsninger, drømme og visioner – der sprænger rammerne og lader den skabende kraft udspille sig. Derfor håber jeg, at modellen vil blive grebet, udfyldt, udfordret, og bidrage til at der skabes forståelse der, som Kant formulerer det, kan understøtte en kunstnerisk "imagination".

"In knowledge imagination serves the understanding whereas in art understanding serves the imagination" (Kant, fra Pallasmaa, 2011, p. 10)





6. LITTERATUR

LITTERATUR

Archer, B., 1995, *The Nature of Research, in Co-design, interdisciplinary journal of design*, January 1995, pp. 6-13

Bang, A., Krogh, P., Ludvigsen, M. & Markussen, T., 2012. "The Role of Hypothesis in Constructive Design Research". In: *The Art of Research IV - Making, Reflecting, Understanding*, Helsinki, 28-29 November 2012.

Baumgart M., McDonough W., S., 1996. *Solar Power, The Evolution of Solar Architecture*. Prestel, Munich, New York.

Beim, A., 2004. *Tektoniske visioner i arkitektur*. København: Arkitektskolens Forlag.

Binder, T., 2012. *What is the Object of Design?* CHI'12, May 5-10 2012, Austin, Texas, USA.

Bjerregaard, L. M., 2005. *Forsegling & Symbiose. Naturvidenskab og naturromantik - en dialog i modern arkitektur. Belyst via studier af grænsen mellem inde og ude*, Arkitektskolens Forlag, Aarhus.

Boubekri, M., 2008. *Daylighting, Architecture and Health - Building Design Strategies*. Architectural Press

Boje, P., 2004. *Villum Kann Rasmussen, Inventor and entrepreneur*. VKR Holding, Hørsholm Denmark.

Braungart, M., McDonough, W., 2008. *Cradle to cradle, remaking the way we make things*. Jonathan Cape, Great Britan.

Bryman, A., 2007. *Barriers to Integrating Quantitative and Qualitative Research*. Journal of Mixed Methods Research. Vol. 1, No 1, p. 8-22. Sage Publications

Bundgaard, C., 2006. *Montagepositioner - en undersøgelse af montagebegrebet i industrialiseret arkitektur*. PhD afhandling, Arkitektskolen Aarhus.

Busk, L.K., Stachowicz, M.S., 2013. *The Challenges of Interdisciplinary Engineering and Science Educations*. International Conference on Engineering Education and Research 2013, Marrakesh.

Büttiker, U., 1993. *Louis I. Kahn, Licht und Raum*, Birkhäuser, Basel.

Carlile, P.R., 2002. *A Pragmatic View of Knowledge and Boundaries: Boundary Objects in New Product Development*. Organization Science, Vol. 13, No. 4, July-August 2002, p. 442-455.

Carlile, P.R., 2003. *Transferring, Translating and Transforming: An Integrative Relational Approach to Sharing and Assessing Knowledge across Boundaries*. Paper presented at the 3rd Annual MIT/UCI Knowledge and Organizations Conference, Laguna Beach, CA, 2004.

Csikszentmihalyi, M., *Flow, optimaloplevelsens psykologi*, Dansk psykologisk Forlag 2005.

Christoffersen, J., Johnsen, K., SBI-RAPPORT 318, 1999, *Vinduer og dagslys - en feltundersøgelse*, 1999

Christoffersen, J., Petersen, E., Johnsen K., 1999, SBI-RAPPERT 277, *Beregningsværktøjer til analyse af dagslysforhold I Bygninger*.

Corrodi, M., Spechtenhauser, K., 2008. *Illuminating. Natural Light in Residential Architecture*. Birkhäuser Verlag AG, Basel Switzerland.

Descottes, H., Ramos, C.E. *Architectural Lighting: Designing with light and Space*. Princeton architectural Press, New York, 2011.

Djursø, H.T., Drejer, A., *Frugtbare partnerskaber - Samarbejde mellem privat og offentligt*, Gyldendal Business 2011 (EKH citeret side 33-39)

Edwards, B., 2010. *Rough Guide to Sustainability*. 3rd ed., London: RIBA Publishing.

Energistyrelsen 2011. *Baggrundsrapport om bygningsklasse 2020*. 31. maj 2011.

Eliasson, O., 2009. Playing with space and light. TED, Filmed feb. 2009. http://www.ted.com/talks/olafur_eliasson_playing_with_space_and_light.html [Accessed June 2013]

Fischer L. H., Borch I., *Spørg hvorfor. Sådan skaber du meningsfulde kvalitative undersøgelser med kunder og brugere*, Nyt teknisk forlag 2012.

Fischer, 1956, *Walter Gropius Architectur*, pp. 15-25.

Fontoynt, M., 1999. *Daylight Performance of Buildings*. James & James

Forty, A., 2000. *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*. New York: T&H

Frankel, J. B., Wallen, N.H., Hyun, H.H., 2009. *How to Design and Evaluate Research in Education*. NY, NT, Mc Graw-Hill.

Flyvbjerg, B., 2005, *Rationality and Power Democracy in Practice*. University of Chicago Press.

Frampton, K., (ed.) 1995. *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. Cambridge MA: MIT Press.

Fuller, S., 2000. *The Governance of Science*, Open University Press. Buckingham. ISBN 0-335-20234-9.

Frandsen, A.K., Ryhl, C., Folmer, M.B., Brorson Fich, L., Øien, T.B., Sørensen, N.L. And Mullins, M., 2011. *Helende Arkitektur*. Aalborg: Aalborg Universitetsforlag.

Gibbons, M., Limoges, C., Nowotny, H., Schwartzman, S., Scott, P., Trow M., 1994. *The New Production of Knowledge – the dynamics of science and research in contemporary societies*. Sage.

Gram-Hansen, K., 2010. *Residential heat comfort practices: Understanding users*. Building Research & Information. 38(2), p. 175-186.

Hansen, E.K., et.al. 2006. *LYS OG ENERGI - solceller i transprente facader*. Slutrapport for PSO F&U projektnr. 2006-1-6302 [Accessed 01.11.13, [http://vbn.aau.dk/da/publications/lys-og-energi--solceller-i-transprente-facader\(02e46c17-be6a-420e-8a68-26e9c555f30f\).html](http://vbn.aau.dk/da/publications/lys-og-energi--solceller-i-transprente-facader(02e46c17-be6a-420e-8a68-26e9c555f30f).html)]

Hansen, E.K., 2008. *LYS+ENERGI+ARKITEKTUR*. Arkitektskolen Aarhus

Hansen, E.K., 2010 "At måle med mennesker/Measuring Life with Real People", [http://vbn.aau.dk/da/publications/measuring-life-by-real-people\(78d029df-f7dc-4f9a-b7b5-3e70db099038\).html](http://vbn.aau.dk/da/publications/measuring-life-by-real-people(78d029df-f7dc-4f9a-b7b5-3e70db099038).html)

Hansen, S., Kolmos, A., Kofoed, L.B., *Teaching and Learning Process Competences by Experimenting and Reflecting*, Das Hochschulwesen. Forum für Hochschulforschung, -praxis und -politik, No. 6, p. 235-242.

Hargedon, A.B. 2002. *Knowledge Brokering: Linking Learning and Innovation. Research in Organizational Behavior*. Vol. 24, p. 41-85.

Hawkes, D., 2008. *The Environmental imagination*. New York: Taylor and Francis Group.

Heschong, L., 1979. *Thermal Delight in Architecture*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Jamison, A., Christensen, S.,H., Botin, L., 2011. *A Hybrid Imagination – Science and Technology in Cultural Perspective*. Morgan & Claypool Publishers.

Jamison, A., 2013. *The Making of Green Engineers, Sustainable development and the Hybrid Imagination*. Morgan & Claypool Publishers.

Jamison, A., 2011. *Knowledge Making in Transition: On the Changing Context of Science and Technology*. In Nordmann, A., et. al. Science Transformed? Debating Claims of an Epochal Break, University of Pittsburgh, Press.

Kahn, L.I. 1969. *Silence and Light*, in Ronner H., Jhaveri S., Birkhäuser, Basel, 1987

Gast, K-P., 2001. Louis I. Kahn: *Das Gesamtwerk - Complete works*. München: DVA.

Kongebroer, S., et.al., 2012. *Hvad med dagslys? – designmanual med forslag til helhedsrenovering*. Henning Larsens Architects, Copenhagen.

Koskinen, I., Zimmerman, J., Thomas, B., Redström J., Wensveen, S., 2011. *Design Research Through Practice. From the Lab, Field, and Showroom*. Morgan Kaufmann, MA, USA.

Klimakommissionen, 2010. *Dokumentationsdelen til Klimakommissionens samlede rapport GRØN ENERGI vejen mod et dansk energisystem uden fossile brændsler*. 2. oplæg, København.

Knudstrup, M. 2004. *Integrated Design Process in Problem Based Learning. The Aalborg PBL Model*, Red. Kolmoses, A., Fink, F.K., Krogh, L., Aalborg: Aalborg University Press.
Krippenfor, K., 2006, ref. finden I Weserlund side 52.

Lam, W.M.C., 1977. *Perception and Lighting as Formgivers for Architecture*. McGRAWL-HILL BOOK COMPANY.

Latour, B., 2008. *A cautious promethea?* Keynote lecture, in *Networks of Design: Proceedings of the 2008 Annual International Conference of the Design History Society*, Universal-Publishers.

Lobell, J., 2008. *Between Silence and Light – Spirit in the Architecture of Louis Kahn*. Shambhala, Boston & London.

Lovgren, S., 2005. *Spray-On Solar-Power Cells Are True Breakthrough*. National Geographic News, January, 2005.

Mathiassen, N., Voltesen, N., 2006. *Lys kompendium II*. Kunstakademiets Arkitektskole, København.

Morgan, M.H., 1960. Vitruvius. *The ten boks on architecture*. Originally published by Harvard University Press in 1914. Dover Publivations, Inc. New York.

Palladio, A., Ed. 2002. *"The Four Books of Architecture"*. First published in 1570 in Venice. Translated from italien by R. Tavernor and R. Schofield. MIT Press.

Pallasmaa, J., 2011. *The Embodies Image, Imaginatio and Imagery in Architecture*. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom.

Pallasmaa, J., 2012. *The eyes of the skin – architecture and the senses*. 3rd. ed.
Rohe, M., 1992, in *Früblicht* 1, No. 4.

Romme, A.G.L., 2003. *Making a Difference: Organization as Design*. *Organization Science*, Vol. 14, No. 5, September-October 2003, p. 558-573.

Sattrup, P.,A. 2012. *Sustainability – Energy Optimization – Daylight and Solar Gain*. PhD afhandling. Royal Danisk Academy of Fine Arts, Copenhagen.

Schön, D. A. 1983. *The Reflective Practitioner*. New York: Basic Books.

Schön, D. A. 1987. *Educating the Reflective Practitioner*. San Francisco: Jossey-Bass.

Selmer F. 2003. *Facadens Lagdeling*. I T. Dahl (red.), *Facaden, teori og praksis*. København: Kunstakademiets Arkitektskoles Forlag, s. 15-25.

Shove, E. 2005. *Consumers, Producers and Practices*. Journal of Consumer Culture, Vol. 5(1) p. 43-64, SAGE Publications, London.

Simon, H. A. 1996. *The Sciences of the Artificial*, 3rd ed. MIT Press, Cambridge, MA

Steane, M.A., 2011. *The Architecture of Light*. Routledge, London and New York.

Teknologisk Institut. 2006. *Transparente solceller - fremtidens elproducerende solafskærmning*, Slutrapport for PSO F&U project 4770. 2006. [Accessed Juni 2013 http://vbn.aau.dk/files/74140638/_12b_Slutrapport_Transparente_solceller_alle.pdf]

Telier, A., Binder, T., Michelis, G.D., 2011. *Design Things*. The MIT Press.

United Nations World Commission On Environment And Development, 1987. Brundtland Report. A/42/427. United Nations. http://en.wikisource.org/wiki/Brundtland_Report_Velux. 2010. Active House - a vision, buildings that give more than they take. Copenhagen http://www.activehouse.info/sites/ah7.omega.oitudv.dk/files/pictures/activehouse_broch_sep2010.pdf

Westerlund, B., 2009, *Design Space Exploration*, PhD thesis, KTH, Stockholm, Sweden.

Whitehead, A.N., 1967. *The aims of Education and Other Essays*. New York: Free Press, p. 99-101.

Wilken, L., 2011. *Bourdieu for begyndere*. 2. Udgave, 2. oplæg, Samfundslitteratur, Frederiksberg C.

ARKIV

(1) 2004 *Slutrapport - arkitektur - Transparente solceller - fremtidens energiproducerende solafskærmning 2004*

(2) 2004 *Transparente facader - Solceller materialitet og modeller, 5.-23. januar 2004*

(3) 2004 *Evaluering af kursusforløbet: Transparente facader - solceller, materialitet af modeller af 12.06.04*

(4) *Lys+energy+arkitektur, Gr. 5, øvelse 1, 2, 3*

(5) *Lys+energy+arkitektur, Gr. 5, program*

(6) *Lys+energy+arkitektur, Gr. 5, endelig aflevering*

(7) 2006 *Slutrapport for PSO F&U projekt nr. 2006-1-6302, LYS OG ENERGI - solceller i transparente facader,*

(8) 2008, *LYS+ENERGI+ARKITEKTUR*. Arkitektskolen Aarhus

(9) *Bolig for livet*, film udarbejdet fra interview øvelsen, Workshop 1

Ovenstående materiale kan rekvireres ved henvendelse
til Lene Rasmussen, Afdelings sekretær
Institut for Arkitektur, Design og Medieteknologi
A.C.Meyers Vænge 15
2450 København SV

lr@create.aau.dk

PUBLICEREDE ARTIKLER, DER INDGÅR I BEDØMMELEN

[1] Hansen, E.K., Gylling, G., Mullins, M., 2013, *Home smart Home A Danish Energy Positive Home Designed with Daylight*, IEEE, Proceedings. Special Issue "Smart Homes" p. 2436-2449
Invited Paper, The Institute of Electrical Engineers, Inc. New York, U.S.A. ISSN 0018-9219

[2] Hansen, E.K., Gylling, G., 2011. *The Window - a Poetic Device and Technical Tool to Improve Life in Energy Positive Homes - a Case Study of an Active House*. World Sustainable Building Conference, SB11, Helsinki.

[3] Hansen, E.K., *Dagslys og energioptimering i boligen*. 2010a, s. 34-37. I Larsen T. S., Sælan, A., Hansen, E. K., Aggerholm, S. *Energiparcel - 4 eksempler på energirenovering af danskeres yndlingsbolig*. Realia A/S. ISBN 978-87-92230-26-3

[4] Hansen, E.K. 2010b, *Denmark's net-zero energy home*. In IEEE Spectrum Technology, The Magazine of Technology Insiders Engineering and Science News, Vol. 47, no. 8.10 p. 34-38, The Institute of Electrical Engineers, Inc. New York, U.S.A.

[5] Hansen, E.K., 2008a. *Den transparente energiproducerende glasfacade*, s. 18-25.
I Hansen, E.K. m.fl. *Lys+energi+arkitektur*, Arkitektskolen Aarhus

[6] Hansen, E.K., 2008b. *Matrix, metode til karakterisering*, s.10-17. I Hansen, E.K. m.fl. "Lys+energi+arkitektur", Arkitektskolen Aarhus

[7] Hansen, E.K. 2008c. *Solceller - et udviklingsperspektiv*, s. 26-29, 4 s. I Hansen, E.K. m.fl. *Lys+energi+arkitektur*, Arkitektskolen Aarhus

[8] Hansen, E.K., 2005. *Udvikling og visioner*. s.81-99. I Berg, M., Hansen, E.K., Kappel, K., Lehrskov, H., *Solceller + arkitektur - en guide til anvendelse af solceller i byggeriet*, Arkitektens Forlag. København

[9] Hansen, E.K., 2002. *Fra Rumteknologi til Bygningskomponent - om udviklingen i solcelleteknologien*. Arkitekten vol. 22, s. 2-6. Arkitektens Forlag. København

[10] Hansen, E.K., *SOLcelle og SOLlys - et arkitektonisk potentiale. Idégrundlag for hvordan solceller og sollys kan spille sammen*, 2001. Arkitektskolen Aarhus.

[1]

[1] Hansen, E.K., Gylling, G., Mullins, M., 2013, *Home smart Home A Danish Energy Positive Home Designed with Daylight*, IEEE, Proceedings. Special Issue "Smart Homes" p. 2436-2449 Invited Paper, The Institute of Electrical Engineers, Inc. New York, U.S.A. ISSN 0018-9219



Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

By ELLEN KATHRINE HANSEN, GITTE GYLLING HAMMERSHØJ OLESEN, AND MICHAEL MULLINS

ABSTRACT | This paper focuses on how smart technologies integrated in a one-family home, and particularly a window, offer unique challenges and opportunities for designing buildings with the best possible environments for people and nature. Toward an interdisciplinary and multidimensional approach, we address the interaction between daylight defined in technical terms and daylight defined in aesthetic, architectural terms. Through field tests of a Danish carbon-neutral home and an analysis of five key design parameters, we explore the contradictions and potentials in smart buildings, using the smart window as an example of how quality of life and technical advances are synthesized and when they contradict. We focus on the need to define quantitative and qualitative values and synthesize these in a multidimensional design approach, toward allowing the house to adapt to a changing climate, satisfy the human needs of the occupants, together with meeting calculated energy requirements. Thus, integrating windows as key design elements in energy-positive buildings addresses aesthetic as well as technical potentials. This integration of factors from different fields can both support and counterbalance one another in the design process. We maintain that a hybrid approach to the energy design is central. The study illuminates an approach of the design of smart houses as living organisms by connecting technology with the needs of the occupants with the power and beauty of daylight.

KEYWORDS | Daylight design; experiment; green buildings; hybrid energy design; solar energy; sustainable development; sustainable smart architecture; windows

“It has been interesting to experience that the house reacts—in some cases it even feels like the house acts as a direct function of human needs. The solar shading, for instance, closes just as we start to feel the need to rub our eyes and the skylight blinds come down just before the sun breaks through the clouds. If you did not know better you might think that the house was wired up to your nervous system.”

—Anne-Mette, occupant [1]

I. INTRODUCTION

The popularity of smart homes, or home automation, has increased greatly in recent years due to the higher affordability and simplicity of the technology. This trend can be anticipated to gather pace following the widespread use of smartphone and tablet connectivity. Through the integration of information technologies with the dwelling environment, structures, components, and appliances are able to communicate interactively to enhance accessibility, energy efficiency, and safety. However, the ability to implement high-tech solutions to automation of functions in a home does not in itself ensure a higher quality of life. A hybrid design approach [3], which considers multidimensional solutions, remains an essential ingredient in achieving overall success.

Manuscript received March 17, 2013; accepted May 28, 2013.

E. K. Hansen and **M. Mullins** are with the Department of Architecture and Media Technology, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark (e-mail: ekh@create.aau.dk; Mullins@create.aau.dk).

G. G. Hammershøj Olesen is with the Department of Architecture and Media Technology, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark and also with VELUX A/S, Hørsholm 2970, Denmark (e-mail: ggho@create.aau.dk).

Digital Object Identifier: 10.1109/JPROC.2013.2267622

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

60 A fundamental design element in energy-generating
61 and CO₂-neutral houses is the direct harnessing of the
62 sun's energy. Smart management technologies with
63 energy-efficient building components can enable dwell-
64 ings to act like living organisms, detecting users' needs,
65 sensing indoor and outdoor climatic conditions, and
66 regulating the required supply of light and heat accord-
67 ingly. Smart technologies can further contribute to an
68 architectural freedom where beautiful spaces simulta-
69 neously create natural living environments and reduce
70 energy consumption. A great challenge lies in integrating
71 building components, control technologies, and user
72 aspects, through a design thinking that focuses on both
73 the qualitative and quantitative values inherent in good
74 architecture.

75 The "hybrid" method is exemplified in the interdis-
76 ciplinary design of a Danish experiment in building a
77 carbon-neutral home [2], [3]. The dwelling was developed
78 by the building industry in close collaboration with archi-
79 tects, engineers, and researchers. This paper explores the
80 experiment with focus on the "smart window" as an
81 example. We investigate how a smart window constitutes a
82 multidimensional design element in the energy-optimized
83 homes of the future, where living quality and technical
84 improvements are synthesized in the design. We will focus

on the complexity and contradictions in designing energy
producing houses and the potential, or need, to define and
synthesize the quantitative and qualitative values of a
house that adapts like a living organism to changing cli-
mate conditions and the needs of the occupants.

To explore our vision, we use some of the qualitative
data and experience collected on the indoor climate and
energy use experienced by the occupants, during the
two years that the house was occupied. In this paper, we
describe the house, the technologies, the overall findings
in the measurements, and the intentions through the
design process. Then, we explore how the smart window
can be employed as a multidimensional design element.
Finally, we define contradictions and opportunities in
designing with both qualitative and quantitative design
parameters.

II. HOME FOR LIFE—AN EXPERIMENT

Judging by looks alone, the simple one-and-a-half-story
190-m² house on a residential street outside Aarhus,
Denmark, is an ordinary single-family home; see the photo
of the house in Fig. 1. The stylish little house is a typical
Scandinavian home. But this house is different. Looking
carefully you will see that the house has a lot of window



Fig. 1. Home for Life: the south-facing smart window facade, the roof with integrated roof top windows, solar cells, solar heat panels, and the weather station on top of the roof. Photo by Adam Mørk.

Hansen et al.: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

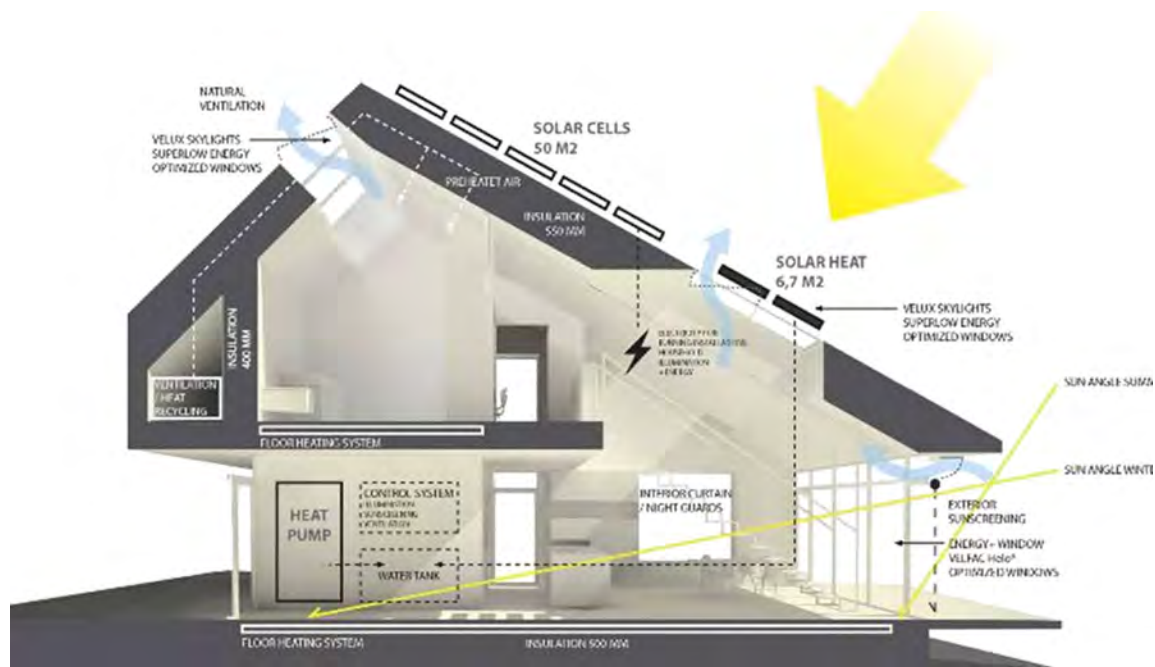


Fig. 2. Energy section illustrating the airflow for natural ventilation, the sunlight from summer and winter sun, the energy producing technologies on the roof, and the control system.

area in all directions, a big south-facing roof with integrated solar panels, photo voltaic, and skylights, and a sort of an antenna on the top of the roof, which on investigation turns out to be a weather sensor. Smart components are compiled into an energy-optimized design: smart windows are carefully designed in a technical and architectural context. The house is designed to generate more than enough power to run itself, solely relying on the sun, while simultaneously creating spaces where one feels comfortable and may enjoy the daylight, fresh air, and close connection to the outdoors [7]; see Fig. 2.

The roof apex has been shifted toward the north, thereby creating a large south facing roof surface. On the ground floor, a central kitchen/dining room next to the west-facing living room emphasizes the large volumes created by the roof. On the first floor are bedrooms and the bathroom; these rooms, like all the rooms, have daylight from more than one direction and have access to balconies or terraces.

Smart facades and roof top windows, tight insulation, and a climate-control system minimize the need for electrical lighting and heating. The sun handles the rest: solar panels, solar thermal collectors, and the Home for Life's south-facing orientation allow the house to generate enough electricity and heat to make it carbon neutral. Moreover, energy calculations indicate that the use of building materials produced with less energy means that

the emissions from their manufacturing will be negated within 40 years [4], [5].

The house was the first of eight experiments that the international window companies Velfac, Horsens, Denmark and Velux, Hørsholm, Denmark, together with their international sister companies Sonnenkraft, Tølløse, Denmark, and WindowMaster, Vedbæk, Denmark, have developed in five European countries [5]. The goal is to build a sustainable, affordable house that uses readily available technology to negate its imprint on the environment and to promote the health and comfort of its inhabitants through plenty of daylight and fresh air.

A. Multidimensional Energy Design

As the project manager on this house, the first author worked closely with engineers, architects, and specialists from the window industry to ensure that every design decision took the overall vision into consideration—to create a house that did not use more energy than it gives back and, at the same time, has a good indoor climate with plenty of daylight and fresh air. Every technical requirement as well as architectural form was framed in terms of aesthetics, energy, and comfort. Various methods were used to communicate the aesthetic and technical elements, often with the smart window as a central element, including traditional architectural drawings, paintings, renderings and models, studies of scale models in light laboratories,

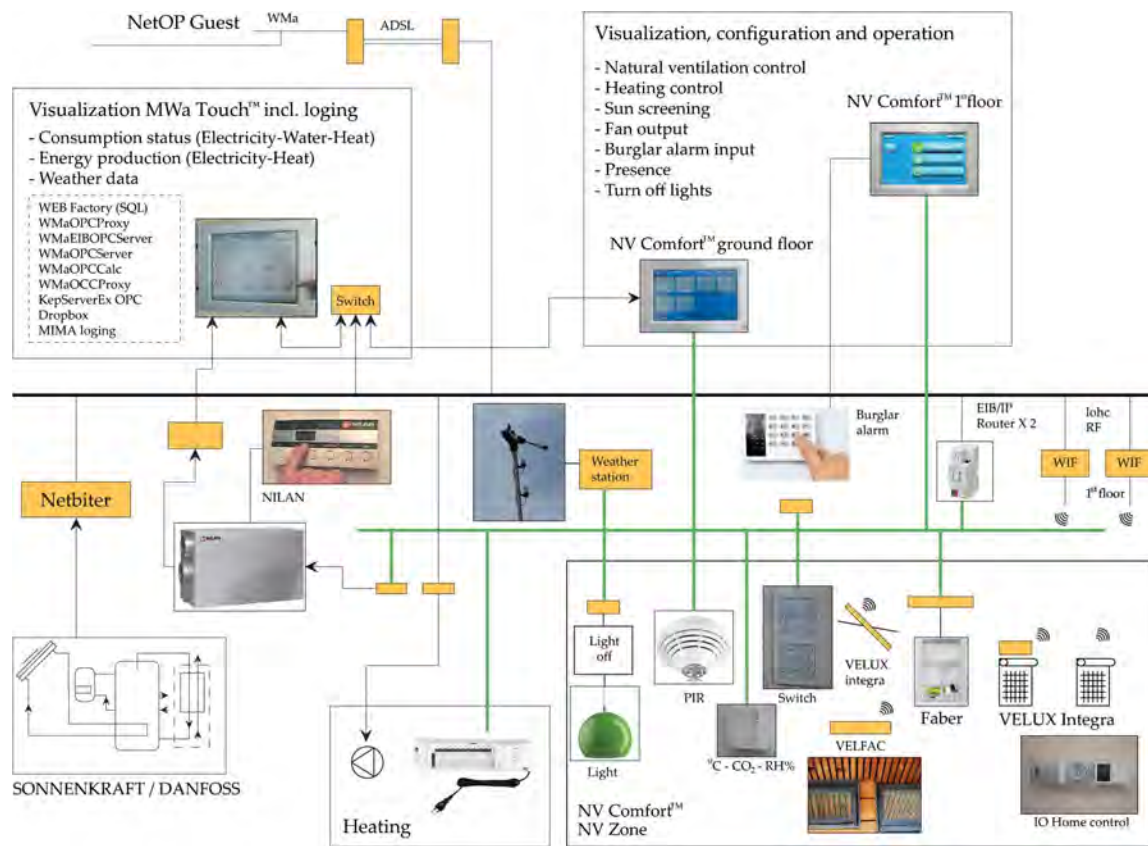
Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

Fig. 3. System description of the house. By WindowMaster.

161 and 3-D animations in Velux Daylight Visualizer2. Estimated energy consumption and production as well as
 162 indoor climate values were continuously calculated in the
 163 Danish software programs BSim and Be06. These calculations were used at all interdisciplinary workshops to
 164 identify relationships between technical elements and aesthetic considerations in all design strategies, in order to
 165 be able to communicate across disciplinary boundaries with a common language and set of concepts. By looking at
 166 the smart window as a holistic design element, we became aware of the fact that the usually employed, quantitative
 167 energy performance criteria were in conflict with other qualities of window design.

174 The process resulted in a design that unites low-tech and smart high-tech elements through an intelligent
 175 control system with sensors in all rooms registering temperature, CO₂, and humidity; and a weather station on
 176 the roof registering wind speed and direction, temperature, and rain. Both are connected to the mechanical
 177 ventilation with heat recovery, the heating system, and not least the smart windows; see the system description
 178 in Fig. 3.
 179
 180
 181
 182

The energy is produced by technologies integrated in the building, harvesting the energy directly from the sun
 184 and converting it into electricity and heat. The 50 m² of polycrystalline photovoltaic panels with 13% efficiency
 185 generate about 5500 kWh a year. That is 20% more electricity than the house is expected to need, although in
 186 winter, it does draw some power from the electricity grid. The frameless dark photovoltaic panels are carefully
 187 integrated into the dark slated south-facing roof as part of the roofing [7].
 188
 189

192 Heating comes in through the windows supplied by the solar thermal collectors. 6.7 m² of collectors catch the
 193 sun's rays on copper plates integrated on the lowest part of the south sloping roof between the roof top windows.
 194 Underneath the plates, copper pipes circulate fluid that absorbs the heat of the plates, converting 95% of the sun's
 195 energy into heat. The collectors can catch indirect sunlight, as well, so the house still has heat on cloudy days.
 196 Should more interior heating be needed, an air-source heat pump will be activated. In one common configuration of
 197 this type of pump, air passes through a heat exchanger placed outside the house to transfer the air's warmth to a
 198
 199
 200
 201
 202
 203
 204

205	liquid medium. The liquid travels to an electricity powered	261
206	compressor inside the house, which applies pressure to	262
207	raise the fluid's temperature further. In general, a heat	263
208	pump is far more energy efficient than conventional oil or	264
209	electric heating, and it has lower CO ₂ emissions. The	265
210	pump's performance depends heavily on the amount of	266
211	heat contained in the air; when it is cold outside, these	
212	heat pumps are not efficient. To avoid that problem, the	
213	heat pump uses the solar collectors to preheat the cold	
214	winter air before it reaches the heat pump. The pump can	
215	then easily produce 20 °C water even when the outside	
216	air is below freezing. After the liquid is compressed, the	
217	heat travels through pipes in the floor and radiators. In	
218	all, the solar collectors and pump are calculated to pro-	
219	duce 8000-kWh heat a year [7].	
220	The house is designed to use the daylight as an energy	
221	optimizing and architectural design parameter to let heat,	
222	fresh air, and light into the interior and to produce energy	
223	directly from the sun. The house does not need a cooling	
224	system, because it provides both ventilation and screening	
225	of the sun when needed. This is where smart windows	
226	come in. The Home for Life has about double the window	
227	area of an ordinary Danish single-family house. This is	
228	possible because of the specialized energy optimized panes	
229	with two or three layers of glazing, depending on orienta-	
230	tion, which in the cooler months reduce the heat escaping	
231	from the inside while allowing ample heat and daylight to	
232	enter. In fact, the windows alone are estimated to deliver	
233	half of the heating needed during wintertime.	
234	Windows in all four walls and a slanted skylight flood	
235	the rooms with sunshine. Built-in external blinds move	
236	autonomously to adjust to glare and heat, angling slats in	
237	response to climatic conditions. To bring in more fresh	
238	air, the horizontal top windows and skylights slide open	
239	with a hiss. "It's fun to listen to" the children report [10].	
240	To minimize the need for artificial lighting, we designed	
241	the space so that daylight pours in from all four direc-	
242	tions. These are clearly articulated in the plan through a	
243	"cross of light" shown in Fig. 4, which also defines exits,	
244	ventilation openings, seating recesses, and frames around	
245	views.	
246	The large windows cut down on the amount of	
247	electrical lighting and mechanical ventilation needed. A	
248	roof overhang on the south side provides shade when the	
249	sun is high in the summer, and shutters and blinds on both	
250	sides of each window regulate the transmittance of heat	
251	and provide privacy; see illustration of the many regulating	
252	layers in the smart window in Fig. 5.	
253	To further reduce the risk of overheating, the windows	
254	are programmed to open on their own to let in fresh air.	
255	Sensors in every room track the temperature, carbon	
256	dioxide levels, and humidity, and a weather station on the	
257	roof monitors outside conditions, including temperature,	
258	wind speed, rain, luminance, and solar radiation. All	
259	information registered by the sensors is gathered by the	
260	intelligent control system.	
	The control system uses that information to decide	261
	when to lower the solar screens or slide open selected	262
	panes or both. These automated adjustments of the	263
	windows, rather than traditional air-conditioning and	264
	heating, provide the bulk of the house's temperature	265
	control.	266
	B. The Actual Energy Use and Indoor Climate	267
	Three main data sets were collected: quantitative tech-	268
	nical performance measures; qualitative data on occu-	269
	pants' experiences; and observations on the experience	270
	windows give to the house and its spaces, captured through	271
	photography and daylight modeling.	272
	The house has been inhabited by two families. Family 1	273
	(F1), a mother, a father, and three children ages 0, 4, and	274
	7, have lived in the house for a year. Most of the registra-	275
	tions from this family are from anthropological studies	276
	from the research project Minimum Configuration, Home	277
	Automation [9], [10]. Afterwards, family 2 (F2), compris-	278
	ing a male and a female and sometimes their grown up	279
	children, bought the house. The registrations for this	280
	family are from a journal they have kept for researchers	281
	[1]. The qualitative registration has been through partici-	282
	pant observations [10] (see anthropologist and occupant in	283
	Fig. 6), cultural probes such as monthly diaries and photos,	284
	as well as observations by the architects [1], [8], [10].	285
	Methods for quantitative registration include energy simu-	286
	lation with solar heat gain and losses in BE06 and Bsim,	287
	simulation of indoor climate conditions, simulation of natu-	288
	ral ventilation, simulation of daylight, measurements of	289
	daylight, and luminance mapping [9], [12]. Some of the	290
	preliminary findings are that the energy consumption for	291
	heating was higher than expected, primarily caused by	292
	different forms of user behavior than anticipated. The cal-	293
	culated requirements for heating were 15 kWh/m ² /year,	294
	and the normalized requirements of the actual use are	295
	20 kWh/m ² /year after two years of occupation. According	296
	to Velux [6], 62% of the divergence from the calculated	297
	and actual use is caused by a different user behavior than	298
	expected, such as higher room temperature, manual over-	299
	ride of sun screening, higher need for domestic hot water,	300
	and lower internal heat loads (appliances + persons).	301
	Another factor is the building itself, which gave a 19%	302
	performance deviation due, among other things, to a less	303
	than anticipated sealing of the envelope. Finally, the tech-	304
	nology control systems cause a further 19% of the diver-	305
	gence due to dissimilar performance than expected by the	306
	heat pump, technical regulations of solar screening, and	307
	efficacy of heat recovery.	308
	It was also found that a good indoor climate requires	309
	sun screening and effective control of the hybrid ventila-	310
	tion system. To achieve the optimum indoor climate, it is	311
	important that there are openable windows in every room.	312
	According to Velux [6], the kitchen/dining room which has	313
	a large south-facing window area and, consequently, a	314
	huge influx of daylight achieves category 1 in terms of	315

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight



Fig. 4. Plan drawing of the ground floor illustrating the entrance from the north, the living room facing south-west and the central kitchen dining room facing south. The yellow "light cross" illustrates the light openings in all four directions.

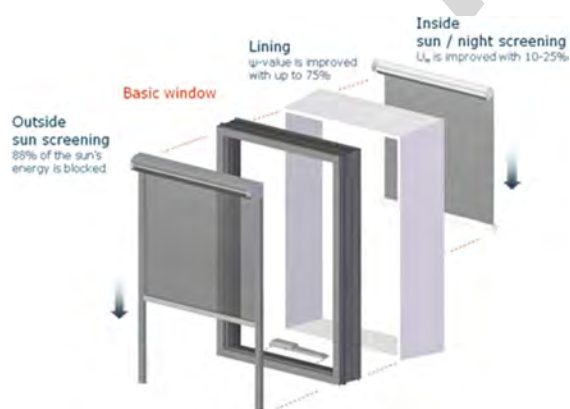


Fig. 5. Smart window construction illustrating the many regulating layers in a smart window. By Velfac.



Fig. 6. The anthropologist's exploration of the house where she explores the occupants and their views on living in a smart home.

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight**Table 1** The Four Window Design Elements: the South-Facing Smart Window; the Square East/West-Facing Windows; the North-Facing Rooftop Windows; and the Light Cross

South facing active facade		
		<ul style="list-style-type: none"> - Constitute all south facing façades of the kitchen, the living room and the south facing room on the first floor. - Vertical fixed windows and doors, over which are installed a number of horizontal windows for automatic natural ventilation. - External automatic sunscreen and internal roller blinds adjust the heat gain and light.
East and west facing windows		
		<ul style="list-style-type: none"> - The three windows are placed parallel to each other in the kitchen and in the living room in the north-west corner. - The windows are fixed parts with no pane sections. - Internal roller blinds and external manually operable shutters adjust light inlet.
North facing roof windows		
		<ul style="list-style-type: none"> - Two bedrooms and the bathroom on the first floor are supported with light from six north facing roof windows. - The pivot windows have automatic window operators, external awning blinds, and internal blackout blinds.
Light cross		
		<ul style="list-style-type: none"> - Four doors giving view and access to the north, south, east and west are visually connected in a cross at ground level. - The concept is repeated on the first floor with openings facing east and west. - The door facing north serves as main entrance. A ventilation window is placed over each of the three remaining doors.

316 thermal comfort and overheating. This is the best of four
 317 classes of the European standard EN 15251 for indoor
 318 climate. This fact emerges from the measurement results,
 319 which show that the room is in category 1 96% of the time
 320 in terms of thermal comfort. The balance between auto-
 321 matic control and the opportunity for resident control can
 322 be optimized, partly in terms of hybrid ventilation systems,
 323 the use of external sun screening and user interaction, so
 324 that the house creates a greater possible degree of comfort
 325 with the lowest possible use of energy. Control in the
 326 spring and autumn in particular can be optimized. Con-
 327 sidering this categorization, it is interesting that the quali-
 328 tative interviews showed that the occupants in many cases
 329 deactivated the solar shading in favor of daylight, views,
 330 and contact with the surroundings [1], [8], [10]. Some
 331 overheating has been recorded, which to some extent
 332 was caused by the occupants overriding the solar shading.

333 The occupants have also overridden the system by
 334 manually opening the windows in the heating season for
 335 fresh air, which influences the energy consumption for
 336 heating [9].

337 This underlines the necessity of awareness of a more
 338 hybrid understanding of how the technical and energy-
 339 efficient approach is influenced by the experience of liv-
 340 ing in the house. It also illuminates the smart window as
 341 a central design element, not as a component but as a
 342 multidimensional design element, where context, techni-
 343 cal, and aesthetic parameters are considered. To ex-
 344 plore this, we have categorized the windows in the Home
 345 for Life as four window design elements. In Table 1, the
 346 four window design elements are illustrated: the south-
 347 facing smart window; the square east/west-facing win-
 348 dows; the north-facing rooftop windows, and the light
 349 cross [2].

III. THE SMART WINDOW: A MULTIDIMENSIONAL DESIGN ELEMENT?

In the following, we explore how the smart window as a central design element needs to be defined through a broad multidisciplinary approach—a multidimensional design process. We want to illustrate that the hybrid approach can be used both as an aesthetic device and a technical tool to improve quality of life in energy positive homes.

The total window area in the Home for Life is 70 m², corresponding to 40% of the floor area, about twice the area of windows in traditional Danish houses. The window area of the four façades is distributed as follows: 70% south, 5% north, 11.5% east, and 11.5% west [2]. During the heating season, automatic natural ventilation from the window openings is supplied by mechanical ventilation, through the means of heat recovery. The Danish energy frame simulation program BE06 estimates that 50% of the energy needed for heating is covered through passive heating through the windows [6].

A. Analyzing the Window Through Aesthetic and Technical Means

There is an increasing tendency in newer buildings to orientate windows so that they may optimize the gain of solar heat. This tendency is a result of quantitatively defined criteria for the reduction of the energy used on heating. However, windows are also essential for the quality of life; they affect our senses and perception of surrounding environments to a great extent as has, for example, been shown in a large number of studies in hospital environments [11]. Thus, focus on the possibilities of harvesting energy directly from sunlight should be combined with the unique opportunities for designing buildings with the best possible natural environments for people; design and new technologies integrated into smart windows require that aesthetics, user experiences, and technical aspects of daylight are addressed [13].

Instead of looking at the performance of the window as an isolated building component, we have already defined four window design elements (Table 1) used in the design of the Home for Life. Analyzing the window design elements in this way makes it possible to look at the performance of the smart window where the context of orientation, function, and indoor and outdoor relations differ.

The following analysis focuses on finding technical and aesthetic aspects of the window design elements in the case study house, where smart windows are key design components to improve indoor climate and the quality of living in the house. The intention of this analysis is to articulate design parameters, which contribute significantly to the smart energy-optimized house [2], such as:

- 1) expression of space and materials evoked through daylight;
- 2) indoor and outdoor relations;
- 3) functional daylight conditions;
- 4) fresh air and comfortable temperature;
- 5) solar heat gain.

1) *Expression of Space and Materials*: The kitchen/dining space is the central and most expressive room in the house as all of the four window design elements are represented in this space. In the kitchen/dining space, the light comes in from five directions. There is constantly sunlight in the kitchen/dining space throughout the year from sunrise until sunset. The entering sunlight adds varying and dynamic accentuations of the space, made more expressive by the automatic external and internal blinds. Fig. 7 illustrates the kitchen/dining room and the changes of light in June in response to the active façade and at noon and in the evening. The first picture illustrates how the sunlight from the rooftop windows strikes the wall and how the sunlight from the south-facing glass façade is blocked by the eaves to prevent overheating from the sun during summer. The second picture illustrates the same daylight situation, while the external shading is down on



Fig. 7. The kitchen/dining room looking east. The light and atmosphere in the room change according to the smart façade and the time of the day. Photos by Adam Mørk.

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

425	the south-facing façade and on the roof top windows to	and the mother of the family fancies looking out of	473
426	prevent overheating. It creates another atmosphere in the	the windows and compares the windows to pictures.	474
427	room because of the indirectly filtered light through the	One window represents one picture; another win-	475
428	blinds, reducing contrasts and glare. The third picture	is a new picture, etc. And they are always dif-	476
429	illustrates the warm low evening sun lighting up the space	ferent. Actually, they enjoy the view so much that	477
430	from west–north–west.	they like to let in more light and heat than permitted	478
431	The room is characterized by a sloping ceiling, which is	by the smart system. Then, they override the system	479
432	a result of the south-facing roof being generously extended	and roll up the awning blinds when the system tries	480
433	to optimize for the generation of energy. Internal windows	to control the heat” [10].	481
434	to the middle bedroom and toilet plus the south-facing		
435	bedroom strengthen this effect. The skylight penetrates	The south-facing window façade faces the road in front	482
436	through the north-facing roof window in this south-	of the house, resulting in the occupants pulling down the	483
437	facing room.	sunscreen to have more privacy [12]. This interferes with	484
438	The modernistic motif of the south-facing glass façade	the expected amount of energy gained through the façade.	485
439	creates a contrast to the east/west-facing windows, which	The anthropologist points out:	486
440	appear as classic holes punched into the façade, through		
441	which the hot and low sunlight is transmitted in the	“At the beginning, the family asked for blinds on	487
442	morning and evening hours. The thick, well-insulated	the first floor, in the living room, and in the kitchen/	488
443	walls and the insulating qualities of the glass create a space	family room. They are used a lot, and at the same	489
444	for a window recess with a place to sit. In her diary in	time, the family is excited about the great view from	490
445	March 2011, the female occupant of the house, family 2,	the house, which is considered a great asset to the	491
446	F2F, writes:	house. So, in general, there is a conflict between	492
		the need for screening as a means of controlling the	493
447	“The window sill in the east-facing window is	temperature on the one hand, and the view and the	494
448	quite naturally used as a seat several times a day. It is	daylight admittance on the other hand” [10].	495
449	a good place to get lost in one’s own thoughts with a		
450	cup of tea after work, or a good place for a break” [1].	In May 2011, the female occupant of the house F2F	496
		writes in her diary:	497
451	After the first three months, test family 1 (F1) explains:		
		“We still notice the many beautiful details of the	498
452	“The best with this new house compared with our	house, including both the slated façades and the	499
453	old house is the light. The light is better and, look,	changing light in the house. We do not have to get up	500
454	we are sitting here, it is past 7 P.M., and the light	from the chair and walk to the window to look out. The	501
455	over the dining table is not lit” [8].	big windows provide a view, whether we are cooking,	502
		sitting in the living room or in our rooms” [1].	503
456	In May 2011, F2F writes in her diary:		
		It has also been reported that the families, in some	504
457	“We still notice the many beautiful details of the	cases, pull up the sunscreen to get the view, which can	505
458	house, including both the slated façades and the	cause overheating [10].	506
459	changing light in the house” [1].	The occupants like the connection to the outdoors;	507
		sometimes they need screening for privacy and sometimes	508
460	The occupants enjoy the daylight from all directions,	they pull up the screen to get the view. These needs can	509
461	which is possible because of the smart window system.	conflict with the need for regulating the façade for passive	510
		solar heat and overheating. The occupants end up	511
462	2) <i>Indoor and Outdoor Relations</i> : The two east/west-	overriding the intelligent system to fulfill their needs for	512
463	facing windows and the south-facing active glass façade	view and privacy.	513
464	create a strong transparent connection to the outside,		
465	illustrated in Fig. 7. The “light cross” also contributes to	3) <i>Functional Daylight Conditions</i> : The two large square	514
466	opening up of the house, connecting to the west through	windows facing east and west, the south-facing active	515
467	the living room and to the north through the hall. In the	window façade, and roof windows in each side of the	516
468	participant observation, the anthropologist writes:	south-facing roof slope result in a daylight factor average in	517
		the kitchen/dining room of around 10%, with large areas of	518
469	“Sitting in the kitchen/family room you easily let	the space exceeding daylight factors of 20% [12].	519
470	your eyes wander to follow life outside the house.	Glare might occur. F1 pulled down the internal and	520
471	The six-year old boy of the family tells how the	external blinds to dim the light level and create privacy,	521
472	family from the dining table can watch the sun rise	which has resulted in reduction of possible solar heat	522

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

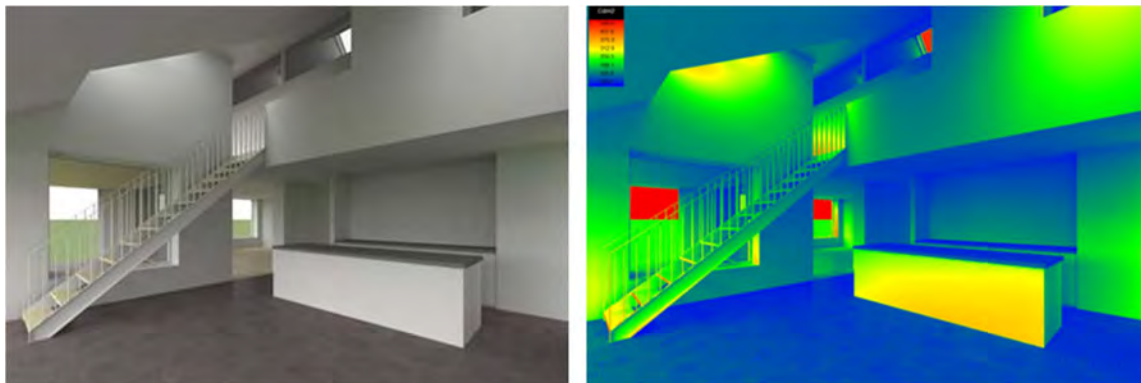


Fig. 8. The kitchen/dining room looking west. Two simulations show that the space has a very well-distributed daylight environment. Simulations developed in Velux Daylight Visualizer 2.

523 gains. The south-facing active façade is critical in the
524 southwest-facing room on the first floor. F2F writes:

525 “It is nice to have so much light in the house. The
526 character of the light changes with the weather. How-
527 ever, my husband has to pull down the external sun-
528 screen to the balcony in the office during the day. The
529 internal blinds are not enough. Too much reflection in
530 the computer screens makes work impossible.”

531 She adds:

532 “Evening blinds and sun screening have started to
533 go down later, meaning that we can enjoy the days
534 getting longer. The timing is perfect.”

535 This accentuates the experience of the house following
536 the rhythm of day and year [1]. See photo and daylight
537 simulations of the kitchen/dining room looking west in
538 Fig. 8 and daylight simulations showing the daylight factor
539 (percent of daylight in the room) of the ground floor and
540 the first floor in Fig. 9.

541 F1 experienced using very little electrical light due to
542 the level of daylight, and the anthropologist notices:

543 “The family has the experience that they use
544 less electrical light than in their old house and
545 they mention the great amount of daylight intake
546 as one of the things they will miss the most,
547 when they move back to their old house from the
548 1970s” [10].

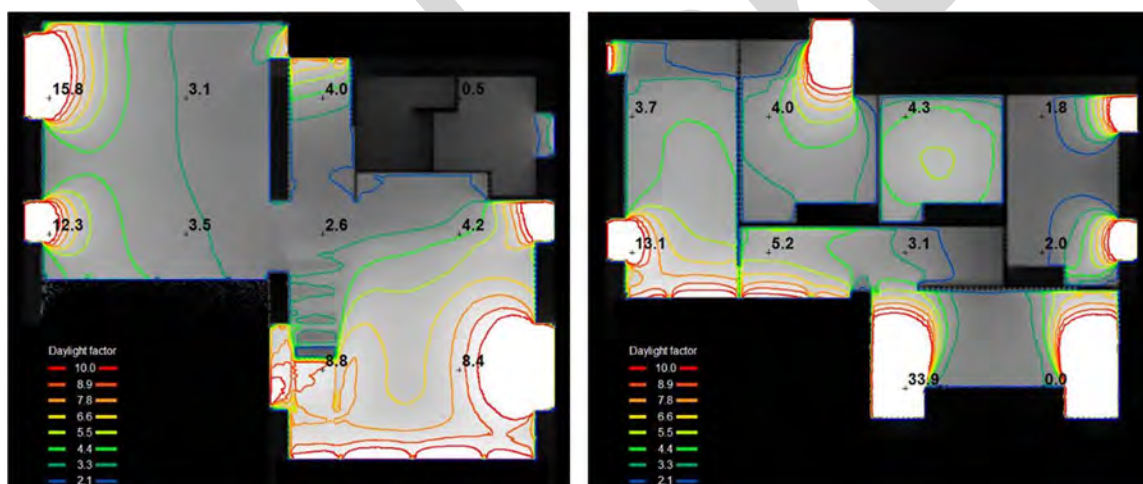


Fig. 9. Daylight factor at ground and first floors. Simulations developed in Velux Daylight Visualizer 2.

Hansen et al.: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

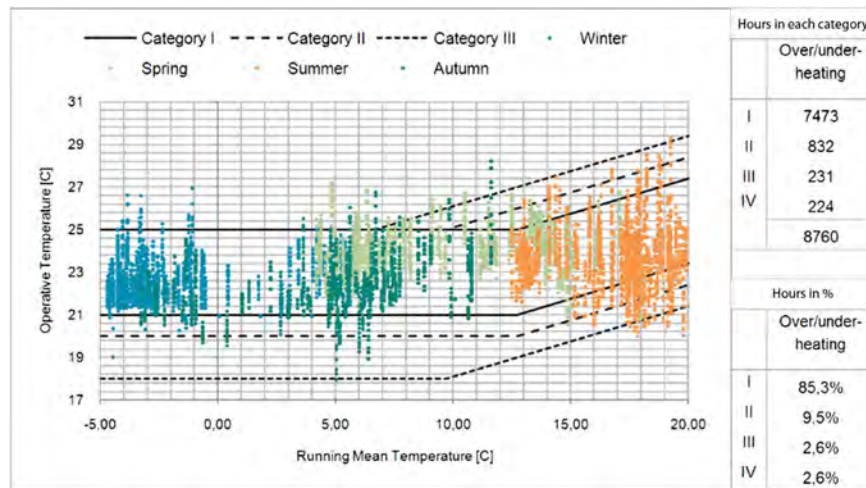


Fig. 10. Indoor climate illustrated according to the European Standard EN15251 showing the measured operated temperature as a function of running mean outdoor temperature. The columns to the right display the number of hours of over/underheating in relation to the categorization in EN15251.

549 The high daylight level reduces the use of electrical
550 lighting. Internal and external shadings are manually used
551 to avoid glare; this can conflict with the need for passive
552 solar heating, which is primarily needed during the heating
553 season, where the sun is low and, therefore, increases the
554 risk of glare.

555 4) *Fresh Air and Comfortable Temperature*: The top
556 windows in the south-facing façade and the doors placed on
557 the “light cross,” together with the roof windows, are pro-
558 grammed for automatic natural ventilation. This aspect of the
559 design has been carefully cultivated. In March, F2F writes:

560 “In March, we experienced that the house changed
561 from winter to summer. The first time the house
562 went into summer state it took us by surprise. It acted
563 differently than we were used to. The windows and
564 roller and awning blinds went down. The air felt and
565 smelled fresher—real outdoor air” [1].

566 The south-facing windows are supported with external
567 automatic sun screening and internal blinds. Temperature
568 was measured to be below the criteria of category 1 in
569 EN15251 for more than 96% of the year. However, the
570 measurements and the observations indicate that there are
571 periods, especially during spring and fall, and shorter
572 periods during summer, when overheating occurs [9], [10].
573 In Fig. 10, the measured temperatures in the house are
574 shown for the first year in relation to the measured
575 outdoor temperatures illustrated according to the Europe-
576 an Standard EN15251. The horizontal axis displays running
577 mean temperature in degrees Celsius (outdoor tempera-

578 ture), while the vertical axis displays the measured
579 operative indoor air temperature in degrees Celsius. The
580 colored dots are all individual hourly measurement points
581 of indoor air temperature; these are colored in relation to
582 the season in which they are measured, respectively,
583 winter, spring, summer, and autumn. For example, the
584 blue dots are indoor air temperatures measured in winter
585 time and are related to the colder outdoor temperatures,
586 whereas the opposite applies for the orange summer
587 measurements. The three types of lines across the table
588 represent categories I, II, and III, defined by the European
589 Standard EN15251; thus, the amount (or percentage) of
590 hours that fall between these lines determines the category
591 of the temperature conditions of the house. The tables to
592 the right of the graph display how many hours fall within
593 each category. The column “over/underheating” shows the
594 number of hours that fall within the area of the respective
595 categories; 7473 h fall within category I and then
596 additional 832 h fall within category II, and so forth.
597 Fig. 10 describes the percentage of the number of hours
598 that fall within each category; 85.3% of hours fall in
599 category I, equaling 7473 h of the total 8760 h in a year.
600 Ideally, all temperatures should be within category I.

601 F2 experienced overheating primarily during winter,
602 which was clearly stated in the diary by F2F from
603 December:

604 “A Sunday with plenty of sun and more than 27 °C
605 in the living room. We had to have the automatic
606 control ventilate a couple of times, but we felt more
607 like opening all doors to outside, to the 2 °C below the
608 freezing point. We did not, but we sat for a while on

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

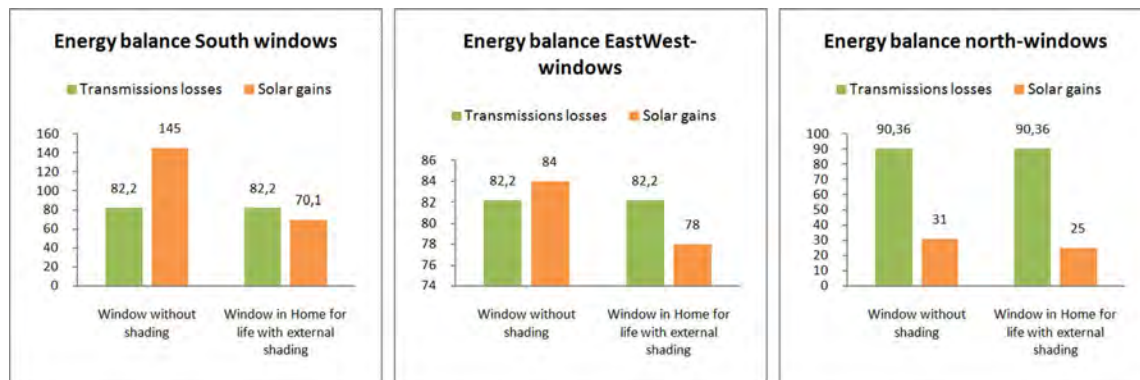


Fig. 11. Energy balance, the solar gain, and transmissions losses in all four directions.

609 the terrace by the living room. The house keeps the
610 warmth, which we could benefit from later that
611 evening and that night. It is still winter, you know” [1].

612 A couple of months later, in February, F2F continued:

613 “We had the pleasure of the sun in February. We
614 came home late on a Saturday afternoon. It was
615 probably 29 °C in the living room and 27 °C in the
616 kitchen. When we entered the house, we were cold, so
617 feeling the warmth was actually very pleasant. The sun
618 was also strong the following day. We pulled down the
619 awning blinds in the kitchen, which instantaneously
620 gave us a pleasant feeling, and the temperature stayed
621 at an acceptable level around 24 °C–25 °C” [1].

622 Finally, in May, F2F writes:

623 “When we experienced in January how the low
624 sun could heat the house up to 28 °C–29 °C by frosty
625 weather, we feared the extensive heat in the summer
626 half-year. However, we managed to keep pleasant
627 temperature. On hot days, the house feels cooler
628 than the temperature outside. It does not take much
629 sun to activate the sun screening and ventilation.
630 Usually, the house is prepared to provide heating,
631 and the air in the house is always fresh” [1].

632 Automatic natural ventilation and automatic external
633 shading are important elements to prevent overheating
634 and support the house with fresh air. During winter, when
635 the sun is low, it is not always possible to prevent
636 overheating by shading and mechanical ventilation. To
637 save energy on heating, the system is not programmed to
638 cool through natural ventilation during the heating season.

639 5) *Solar Heat Gain*: According to calculations, the south-
640 facing window supports the house with solar heat during

641 the heating season, the east/west-facing windows are
642 neutral, and the north-facing windows bring no energy [7].
643 During the design of the house, it was simulated that half
644 the required energy needed for heating could be covered
645 by solar heat gain through the windows [7]. See Fig. 11 for
646 energy balance, the solar gain, and transmission losses in
647 all four directions. The figure shows the so-called energy
648 balance of, respectively, the south-, east/west-, and north-
649 facing windows. Each diagram has two sets of columns; the
650 first shows the window without shading and the second
651 shows the window with external sun shading. The green,
652 left column shows the transmission loss: the calculated
653 loss of energy from the house to the outside through the
654 window. The orange, right column shows the calculated
655 heat gain from the sun that enters from the outside
656 through the window. In case of the south-facing windows
657 with no external sun shading, more heat enters into the
658 building than is lost and the window supplies the building
659 with energy in the form of heating. When external sun
660 shading was added to south-facing windows, only half the
661 solar gains were supplied to the building, compared to
662 previously resulting in a transmission loss, which is a little
663 larger than the solar heat gain. Here, it is also important to
664 consider the consequences of heat loss (or gain) through
665 the window in terms of overheating inside the house or the
666 fact that sun screening may limit the views of the outside.
667 The diagram also shows that the south façade has the
668 largest possibility for supplying the building with heating,
669 whereas the north-facing windows have the smallest
670 potential; east/west-facing windows have the potential to
671 gain as much energy as they lose, which is the ideal
672 scenario.

673 F2 shows interest in the fact that the sun supports the
674 house with energy. In November, F2F writes:

675 “We hope for a very sunny winter to support the
676 balance of energy. ‘Good weather’ has a completely
677 new meaning to us now” [1].

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight**Table 2** The Table Presents Negative and Positive Impact Aspects of the Respective Window Design Elements. The Table Presents the Contradictions in the Different Values and Thereby the Importance of Defining the Window as a Multidimensional Design Element in the Design of Smart Homes

		South facing active facade	East and west facing windows	North facing roof windows	Light cross
A E S T H E T I C	Expression of space and material	+	++	++	+
	Indoor and outdoor relations	++	++	+	+
		Both yes and no Yes: Openness underlines indoor/outdoor relation and good daylight conditions. No: The transparency displays the occupants and limits privacy.	Yes Yes: Variation of light intake creates possibilities in spatial experiences changing over day and year, casting light deeply into the space; the sills provide built-in furniture.	Yes Yes: Diffuse daylight contribute to experiential qualities of space and provide a good even daylight environment.	Yes Yes: Transparency creates a feeling of safety for the occupants and the doors provide direct access to the surrounding in all directions.
T E C H N I C A L	Functional daylight conditions	+	+	++	+
	Fresh air	+	+ / -	++	+
	Comfortable temperature	-	-	++	+ / -
	Solar heat gain	+	+ / -	-	+ / -
		Both yes and no Yes: Passive energy from solar heat gain. No: Too much solar heat gain creates overheating, sunscreen and natural ventilation required.	Both yes and no Yes: Provides daylight deep into the spaces morning and evening. No: The low solar inlet during spring and fall result in overheating.	No No: No passive energy contribution through the window but energy loss.	Yes Yes: Possibility of cross ventilation, intake of air for natural ventilation and letting daylight deeply into the spaces throughout the entire year.

678 The south-facing windows support the house in the
679 heating season, but not as much as was calculated, which
680 was mainly caused by a different user behavior than
681 predicted in the simulations.

682 IV. DISCUSSION

683 With the aim of illustrating how a multidimensional ap-
684 proach to the smart window as a design element can be
685 used both as an aesthetic method and a technical tool, this
686 paper focuses on a key subject within the ongoing sustain-
687 ability discourse: how can smart architecture improve
688 quality of life and not merely technological prowess? The
689 case study used presents an experimental, full-scale,
690 energy-positive house with real occupants and profes-
691 sionals involved. While the presented data are drawn from
692 the large amount of information gathered, much larger
693 than can be presented in this single paper, important evi-
694 dence indicates that the window is of primary importance
695 as an element of the “smart house.”

696 There are obvious technical disadvantages to designing
697 energy-positive houses with extensive glazed areas.
698 Healthy indoor climate conditions are defined by stan-
699 dards such as the European Standard EN15251 or energy
700 performance defined in the Passive House Standard. How-
701 ever, the occupants’ experiences in the present case study

702 point to the importance of their experience of smart
703 windows and the subsequent effect of their experiences on
704 energy use. Differentiated daylight, awareness of archi-
705 tectural space, fresh air, glare, relation to site-specific sur-
706 roundings through physical and visual access, and views of
707 the surrounding landscape and cityscape are all essential
708 factors to be considered in future sustainable housing,
709 which aims to have life-improving effects. In Table 2, we
710 have rated the window design elements in relation to the
711 aesthetic and technical findings described in this paper.
712 (–) indicates that the window design element does not
713 add to the quality of living, whereas (+) or (++) indi-
714 cates that the window design element adds “good” or “very
715 good” qualities to the house [2].

716 The analyses also underline various contradictions
717 between aesthetic and technical aspects, which illustrate
718 that it is imperative that potential conflicts be addressed as
719 early as possible in the design process. The issues about
720 quality are important but are often overlooked in a purely
721 technical analysis. An occupant-oriented approach to both
722 programming and analysis of the houses is valuable for an
723 optimal use of daylight potential. Focus on the life in the
724 house and the potentials of smart solutions help us in
725 understanding how to work with nature instead of fighting
726 it. It also helps us understand how new products and
727 technology can meet traditional and future requirements.

Hansen *et al.*: Home Smart Home: A Danish Energy Positive Home Designed With Daylight

We maintain that there are potentials in a multi-dimensional approach to the design of smart energy-optimized homes. All four analyzed window design elements afford occupants with aesthetic qualities, such as the evoking of space and materials through daylight, indoor and outdoor relations. While it is clear that the aesthetic aspects of dwelling in a smart house have an important role to play in its design, this paper points out that these aspects do not always correspond with the technical demands placed on the design. The challenge is to develop tools, design strategies, legislation, and building components where the complex synergy between technical and aesthetic design parameters can be united in smart homes—smart homes for people. ■

REFERENCES

- [1] A. M. Juhl, "Diaries from Home for Life, 2012.
- [2] E. K. Hansen and G. G. Olesen, "The window—A poetic device and technical tool to improve life in energy positive homes: A case study of an active house," in *Proc. World Sustainable Building Conf.*, Helsinki, Sweden, 2011, SB11. [Online]. Available: http://vbn.aau.dk/files/58653122/20110701_SB11_Paper_Final.pdf
- [3] A. Jamison, S. H. Christensen, and L. Botin, *A Hybrid Imagination. Science and Technology in Cultural Perspective.* San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2011.
- [4] VELUX, Bolig for livet. [Online]. Available: [http://www.velux.dk/om_velux_gruppen/model_home_2020/bolig_for_livet?](http://www.velux.dk/om_velux_gruppen/model_home_2020/bolig_for_livet?akeywords=bolig%20for%20livet&resNum=1)
- [5] VELUX, Model home 2020. [Online]. Available: http://www.velux.com/Sustainable_living/Model_Home_2020
- [6] Velux, Energy design. [Online]. Available: http://www.velux.com/sustainable_living/model_home_2020/home_for_life/energy_design
- [7] E. K. Hansen, "Denmark's net-zero energy home," *IEEE Spectrum*, vol. 47, pp. 34–38, 2010.
- [8] VELFAC, Diary: August 2010–May 2010. [Online]. Available: <http://www.velfac.co.uk/Global/Diary>
- [9] Om Ingeniørhøjskolen i Århus. [Online]. Available: <http://www.ih.dk/Om-os-1976.aspx>
- [10] J. M. Entwistle, "Antropologiske studier i bolig for livet," Alexandra Institute, Aarhus, Denmark, 2010.
- [11] A. Frandsen, C. Ryhl, M. Folmer, L. Fich, T. Øien, N. Sørensen, and M. Mullins, "Helende Arkitektur," Aalborg Universitetsforlag, Aalborg, Denmark, 2011.
- [12] W. Österhaus, "Light in Home for Life," Ingeniørhøjskolen Aarhus, Aarhus, Denmark, 2010.
- [13] D. Hawkes, *The Environmental Imagination—Technics and Poetics of the Architectural Environment.* London, U.K.: Taylor & Francis, 2008.

ABOUT THE AUTHORS

Ellen Kathrine Hansen received the M.Arch. degree from the Royal Danish Academy of Fine Arts, Copenhagen, Denmark, in 1993. She is currently working toward the Ph.D. at the Department of Architecture and Media Technology, Aalborg University in Copenhagen, Denmark, writing her Ph.D. dissertation titled "Designing with light." She is an External Associate Professor at the Department of Architecture and Media Technology, Aalborg University, where she currently heads the project of starting a new master program in lighting design. She was the Design and Test Project Manager of Home for Life from 2006 to 2011 at Velfac A/S, Horsens, Denmark, and mother company VKR Holding, Hørsholm, Denmark.



Gitte Gylling Hammershøj Olesen received the B.S. and M.S. degrees in civil engineering with specialization in architecture from Aalborg University, Aalborg, Denmark, in 2009, where she is currently working toward the Ph.D. degree in sustainable architecture at the Department of Architecture & Media Technology, in collaboration with skylight inventor and producer VELUX A/S, Hørsholm, Denmark.



Acknowledgment

The authors would like to thank the design team behind the Home for Life: A. Tyrrestrup from AART architects, H. Sørensen and A. Worm from Esbensen Rådgivende Ingeniører, R. Lildholdt from Velfac, L. Feifer and P. A. Andersen from Velux, and S. Hagberg and S. Hagelskjær from WindowMaster; the researchers behind the MC–HA project: P. G. Larsen and A. Forland and W. Österhaus from the Engineering Collage of Aarhus and J. Entwistle from Alexandra Institute; and the two test families, the Simonsen and the Kristensen, for sharing their experience of living in Home for Life.

Michael Mullins received the M.Arch. degree from the Royal Danish Academy of Fine Arts, Copenhagen, Denmark and from University of Natal, South Africa, both in 1979, and the Ph.D. degree from Aalborg University, Aalborg, Denmark, in 2005.

He is an Associate Professor, currently researching at the Department of Architecture and Media Technology, Aalborg University. Until 2013, he has served as Head of the department.



[2]

[2] Hansen, E.K., Gylling, G., 2011. *The Window – a Poetic Device and Technical Tool to Improve Life in Energy Positive Homes – a Case Study of an Active House*. World Sustainable Building Conference, SB11, Helsinki.

The Window - a Poetic Device and Technical Tool to Improve Life in Energy Positive Homes - a Case Study of an Active House



Ellen Kathrine Hansen
Cand. Arch. MAA
Project Manager
VKR Holding A/S
Denmark
ekh@vkr-holding.com



Gitte Gylling
Industrial PhD student
M.Sc.Eng. Architecture
Aalborg University
VKR Holding A/S
Denmark
ggs@vkr-holding.com

Summary

The aim of this paper is to illustrate how a holistic approach to the window as a design element can be used as a poetic device and technical tool to improve quality of life in energy positive homes.

- Through a case study of the residential building Home for Life, built in accordance with the Active House vision, 'fictive user statements' from the design phase and the end users' experience of living in the house form the primary source to define and evaluate the potentials of the window. We explore the interaction between the window used as a technical tool to optimise indoor climate through fresh air, comfortable temperature and functional daylight and provide the house with solar heat and the window used as a poetic device to create living environments where expression of space and materials are evoked through daylight and where indoor and outdoor relations are essential elements for the quality of the life in the building.

The analyses are based on the definition of four window design elements used in the house: the south facing active window façade, the east and west facing square windows, the north facing roof windows and the light cross. The window design elements are analysed and their potentials as a poetic device and a technical tool to improve life are accentuated.

The paper concludes that all four analyzed window design elements have potentials to provide the people living in the house with poetic qualities such as expression of space and material evoked through daylight and indoor and outdoor relations. Not all window design elements are contributing with technical values in all aspects. Three of the four window elements have a neutral or negative energy balance and two window elements will have a negative effect on comfortable temperatures if they are not regulated by external sunscreens and natural ventilation. The hypothesis; 'a holistic approach to the window as a design element can be used both as a poetic device and a technical tool to improve quality of life in energy positive homes' can be verified. It is clear that the poetic aspects have an important role in the design. The paper points out that these aspects do not always correspond to the technical needs.

The paper explore the challenge to develop tools, design strategies and legislation where the valuable synergy between technical needs and human needs for the poetic aspects can be united by the window as a central design parameter.

Keywords: Window, Poetic Device, Technical Tool, Energy Positive Building, Active House, User

1. Introduction

The window is essential for the quality of life. Windows affects our senses and perception of surrounding environments to a great extent. In Northern Europe people spend up to 90% of their time indoors; often in poorly designed buildings shutting out daylight and creating artificial environments [1]. Restricting windows as a tool for solar heat gain rather than utilising its qualities is an increasing tendency in new buildings as a result of the narrow demand for saving energy for heating. Focus on the possibilities of harvesting energy directly from sunlight by energy optimised holistic design and development of new technologies offers unique challenges and opportunities for designing buildings with the best possible natural environments for people. This paper, therefore, addresses the interaction between daylight in technical terms and daylight in poetic, architectural terms.

1.1 Active House vision and seven experiments

Improving quality of life in future buildings is an ambition pursued by Active House which represents a vision of buildings that 'give more than they take', a vision of designing a house that has low energy consumption, produces energy, has a healthy and comfortable indoor climate and is carbon neutral. At the same time the house is to be designed with respect for the local and global environment and optimised to utilise natural resources such as daylight to improve technical as well as poetic and aesthetic aspects. [2]

As a case study lab for exploring the potentials of the Active House vision in a full scale context, seven single family houses are currently being designed, constructed and tested in five European countries. A test family moves into each house to live in and with the house. Thereby, it will be possible to explore and learn from the relations between objectives, design strategies, animations, and calculations on one side, and reality on the other, when real people play, sleep, eat, relax in and enjoy their homes. [3] [4]. This paper focuses on a single case study, the first experiment and house built in accordance with the Active House vision, Home for Life near Aarhus in Denmark.

2. Home for Life – design process

The development of Home for Life was an interdisciplinary design process through workshops with participation from architects (AART Architects), engineers (Esbensen Engineers), window industry specialists (VELFAC and VELUX Group), daylight specialists, anthropologists and a philosopher. This team developed and defined the design principles and vision of the building through ten workshops. The description here is based on the authors of this article as Ellen Kathrine Hansen was the project manager of the process.

2.1 2020 statements, objectives and parameters

To define a set of parameters in support of the life in the house, the objectives were built on a scenario of a family living comfortably in the house after a 10-year period – not on the parameters of the physical properties of the house at the time when it was constructed. Therefore, the overall objectives define qualitative parameters with focus on how a family will experience the house after 10 years (in 2020) of *living* in it. For this purpose a fictional interview was set up, placing the design team in the occupants' position in year 2020 which led to the definition of the following 'Fictional interview statements from 'users' year 2020. Based on this we define following parameters to analyse the window as a poetic devise and technical tool.

The fictitious future year 2020 is employed in continuation of the current discussions going on related to the future aims of sustainable architecture. The year 2020 in many regulative formulations and tool appears to represent a common milestone in the development [14].

Table 1 User statements, objectives and parameters identified through the design process.

Users statements year 2020	Objectives and approaches referring to Active House parameters	Parameters for analysing the window
<p>“Our home has an atmosphere that makes us feel at home, we enjoy the seasons of the year and the rhythm of the days, the house has a close relation to nature and the surroundings, which gives us endless variations and narratives.”</p>	<p>⇒ Has a positive impact on the environment</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modifying the house to suit local housing estates. - Designing a house of high architectural merit based on space and indoor/outdoor relations. - Choosing materials that have minimum impact on the environment. - The atmosphere allows the expression of material and space (through daylight). 	<ul style="list-style-type: none"> - Expression of space and materials evoked through daylight - Indoor and outdoor relations
<p>“In our home we have plenty of fresh air and daylight, which we enjoy, and we are hardly ever ill.”</p>	<p>⇒ Creates a healthier and more comfortable life</p> <ul style="list-style-type: none"> - Optimised daylight conditions with a large window area (40% of the floor area) distributed round all four façades and the roof, with most of the glass facing south. - Fresh air with hybrid ventilation, in which automatic natural ventilation is supplemented by mechanical ventilation in the heating season. - A comfortable temperature automatically controlled by sun screening products, ventilation and heating systems. - Maximised poetic potential of daylight in the main spaces of the house. 	<p>⇒</p> <ul style="list-style-type: none"> - Functional daylight conditions - Fresh air and comfortable temperature
<p>“Living here provides us and our children with a sound understanding of the balance with nature and a good feeling that we give back more than we take – in our house we produce more energy than we consume.”</p>	<p>⇒ Contributes positively to the energy balance of the building</p> <ul style="list-style-type: none"> - Meeting the energy demands of 2020 building regulations. - Minimising energy consumption to building regulations Energy Class 1 via energy-optimised design by making use of passive solar thermal energy through the windows. - Producing CO₂ neutral energy with a combination of solar heating, solar-driven heat pumps and solar arrays. 	<p>⇒</p> <ul style="list-style-type: none"> - Solar heat gain

2.2 An interdisciplinary design process

With offset in the ‘users’ 2020 statements, objectives and parameters defined in Table 1 the team designed Home for Life. Various methods were used to communicate the poetic and technical elements, often with the window as a central element - from traditional architectural drawings, paintings, renderings and models, to studies of scale models in light laboratories to 3D animations in VELUX Daylight Visualizer2 [5]. Estimated energy consumption and production as well as indoor climate values were continuously calculated in the Danish programs BSim [6] and Be06 [7]. These calculations were used at all workshops to identify relationships between technical elements in the different design strategies to be able to communicate across disciplinary boundaries.

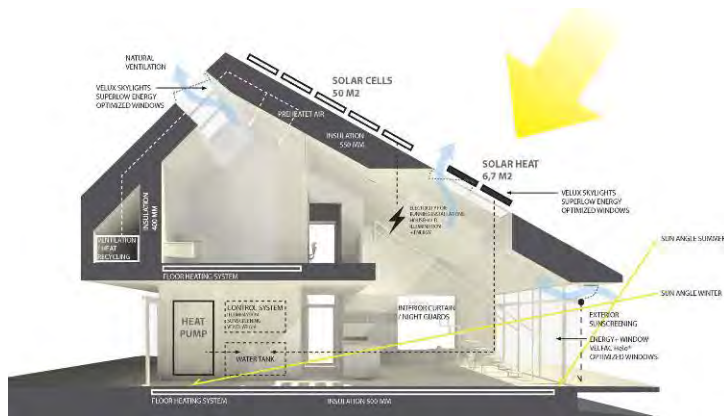


Fig. 1 Energy concept section through Home for Life.

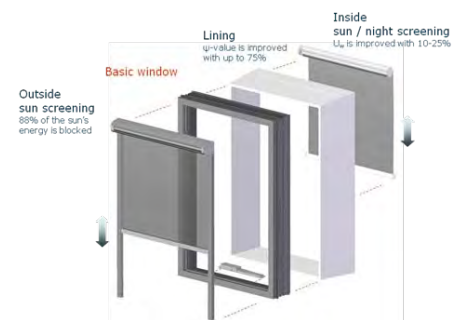


Fig. 2 Principle of intelligent window elements.

The house is located in Lystrup in Denmark. It is orientated to the south, which also gives a view of the landscape and the bay. The geometry originates from a traditional Danish single family house of 1.5 storeys. The roof pitch is moved north to establish a larger south facing roof slope to harness the energy directly from the sunlight for hot water and electricity. The house is simulated to produce more energy than needed for its operation. [7] [15]

2.3 The window as design element

Throughout the design of the house window elements and daylight have played a central role. The window area is 70 m² corresponding to 40% of the floor area. The window area of the four façades is distributed as follows: 70% south, 5% north, 11.5% east and 11.5% west. During the heating season, automatic natural ventilation from the window openings is supplied by mechanical ventilation by heat recovery. The energy frame simulation program BE06 estimates that 50% of the energy needed for heating is covered through passive heating through the windows [7].

The house can be defined and analysed by the four window design elements outlined below.

Table 1 Window design elements.

South facing active façade		
		<ul style="list-style-type: none"> - Constitute all south facing façades of the kitchen, the living room and the south facing room on the first floor. - Vertical fixed windows and doors, over which are installed a number of horizontal windows for automatic natural ventilation. - External automatic sunscreen and internal roller blinds adjust the heat gain and light.
East and west facing windows		
		<ul style="list-style-type: none"> - The three windows are placed parallel to each other in the kitchen and in the living room in the north-west corner. - The windows are fixed parts with no pane sections. - Internal roller blinds and external manually operable shutters adjusts light inlet.
North facing roof windows		
		<ul style="list-style-type: none"> - Two bedrooms and the bathroom on the first floor are supported with light from six north facing roof windows. - The pivot windows have automatic window operators, external awning blinds, and internal blackout blinds.
Light cross		
		<ul style="list-style-type: none"> - Four doors giving view and access to the north, south, east and west are visually connected in a cross at ground level. - The concept is repeated on the first floor with openings facing east and west. - The door facing north serves as main entrance. A ventilation window is placed over each of the three remaining doors.

3. Analysis

3.1 The hypothesis

The hypothesis is that a holistic approach to the window as a design element can be used both as a poetic device and a technical tool to improve quality of life in energy positive homes.

Through this paper the hypothesis is tested via exploring how the window (defined as four window design elements) can be used as a poetic device (expression of space and materials evoked through daylight and Indoor and outdoor relations) and technical tool (functional daylight conditions, fresh air and comfortable temperature and solar heat gain)

To explore whether the stated hypothesis can be verified or not the case study house Home for Life is analysed. There are three main data sets used: the technical performance measures; the experiences of occupants; and the phenomena of light as captured through photography and daylight modelling. The analyses put forward here not only focus on user perspectives and

experiences from living in the house but sets these within wider cultural contexts. Methods and data are part of an ongoing research project called MIMA [8]. The analyses in this paper has its focus on the user perspective reflected in the quote ‘Just imagine if the quality of our buildings was measured by their ability to improve life’ [8].

3.2 Methods for data registration and analyses

“For the purposes of this kind of research the only reliable instruments of observation are the human senses.” – Dean Hawkes [9]

A wide range of data registration has been made in relation to the case study. Concerning qualitative registration the triangulation of methods has been a key approach in order to create as colourful an illustration of the house as possible. Methods for qualitative registration include semi-structured interviews [10] [Kvale], participants observations [11], cultural probes such as monthly diaries and photos [4] [17], observations of the house by architects [4] [12] [11]. Methods for quantitative registration are from the natural scientific and engineering fields and include energy simulation with solar heat gain and losses in BE06 and Bsim [BE06 and Bsim], Simulation of indoor climate conditions in Bsim [Bsim], simulation of natural ventilation, simulation of daylight, measurements of daylight, Luminance mapping [4],

Together the quantitative and qualitative methods will attempt to measure, register and capture the poetic and technical aspects of the house [4].

3.3 Analysing window performance through poetic and technical means

The following analysis focus on analysing the qualitative and poetic aspects of the window design elements in the case study house Home for Life [15].

3.3.1 Expression of space and materials evoked through daylight



Fig. 3 Daylight variations in the kitchen/dining area in strong midday light, with sun screens and in the afternoon sun. Photos by Adam Mørk.

The kitchen/dining space is the central and most expressive room in the house as all of the four window design elements are represented in this space. The room is characterised by the sloping ceiling, which is a result of the extended south facing roof optimised for generating energy. This effect is strengthened by internal windows to the middle bedroom and toilet plus the south facing bedroom. The sky is visible through the north facing roof windows in this south facing room. In the kitchen/dining space the light comes from five directions. In May 2011 the female occupant of the house family 2 female (F2F) writes in her diary: *“We still notice the many beautiful details of the house, including both the slated façades and the changing light in the house. We don’t have to get up from the chair and walk to the window to look out. The big windows provide a view, whether we are cooking, sitting in the living room or in our rooms”* [17]. There is constantly sunlight in the kitchen/dining space throughout the year from sun rise till sunset. The entering sunlight adds varying and dynamic markings in the space which can be adjusted by pulling the external and/or internal blinds.

The modernistic motif of the south facing active glass façade creates a contrast to the east and west facing windows which appear as classic holes in the façade, through which the hot and low sunlight is transmitted in the morning and evening hours. The thick well insulated walls and the insulating qualities of the glass make space for creating a window recess with a place to sit. In her diary in March F2F writes: *“The window sill in the east facing window is quite naturally used as a seat several times a day. It is a good place to get lost in one’s own thoughts with a cup of tea after work, or a good place for a break”* [17].



Fig. 4 One photo and two simulations of the luminance distribution made in VELUX Daylight Visualizer [5]. Photo by Gitte Gylling.

Daylight also enters the kitchen dining space from the North facing roof windows in the upstairs bathroom. A glassed wall between the bathroom and hall area provides for this diffuse light from to access from above resulting in a very comfortable daylight environment in the space. Fig. 4 shows both in simulation and registration that the space has a very well distributed daylight environment, through the four window elements and the roof top windows in the roof.

3.3.2 Indoor and outdoor relations

The two east/west facing windows and the south facing glass façade create a strong connection to the outside via its transparency. The light cross also contributes to opening the house and creating relations to the west through the living room and to the north through the hall. In the participant observation the Anthropologist writes: *“Sitting in the kitchen/family room you easily let your eyes wander to follow life outside the house. The 6-year old boy of the family tells how the family from the dining table can watch the sun rise and the mother of the family fancies looking out of the windows and compares the windows to pictures. One window represents one picture; another window is a new picture, etc. And they are always different. Actually they enjoy the view so much that they like to let in more light and heat than permitted by the system. Then they override the system and roll up the awning blinds when the system tries to control the heat”*. [19]

The south facing active façade opens the room to the south accentuating the slated floor and walls continuing out onto the terrace. Family 2 (F2) are especially satisfied with the windows to the floor and in their diary express the joy in seeing snow right on the other side of the window, in December: *“It feels like sitting right in the drift, without being cold. The snow provides additional light – white in white. The frosty sky looks extraordinarily beautiful from the house, because from there we have a view of the entire horizon and its cool pastel shades”* [17]. This is an interesting observation pointing to a new potential made possible by the new energy optimised windows with very low heat transmittance. In March F2F writes: *“The snow around the house has disappeared, and the terrace in front of the kitchen is visible again. It suits the kitchen with the slate tiles that continue out on the terrace, one of the details we have fallen in love with...”* [17].

The south facing window façade is facing the road in front of the house causing inconvenient insight resulting in the occupants pulling down the sun screen to have privacy [Werner]. This interferes with the expected amount of energy gained through the façade. The Anthropologist points to: *“At the beginning the family asked for blinds on the first floor, in the living room and in the kitchen/family room. They are much used, and at the same time the family is excited about the great view from the house, which is considered a great asset to the house. So in general, there is a*



Fig. 5 View from the house over the city- and landscape. Photos by Gitte Gylling.

conflict between the need for screening as a means of controlling the temperature on the one hand, and the view and the daylight admittance on the other hand" [18].

On the direct access to outdoor spaces from inside in March F2F writes: "On really good days in March it has been possible to enjoy the sun on the south facing balcony above the sitting room. It has been comfortable – just what we had been waiting for. We look forward to enjoying life outdoors during the summer half-year. There is ample opportunity for living around the house throughout the year. If we need shelter, the covered terrace at the living room is a suitable place" [17].

3.3.3 Functional daylight conditions

The two large square windows facing east and west, the south facing active window façade and roof windows in each side of the south facing roof slope result in a daylight factor average in the kitchen/dining room around 10% with large areas of the space exceeding daylight factors of 20%.

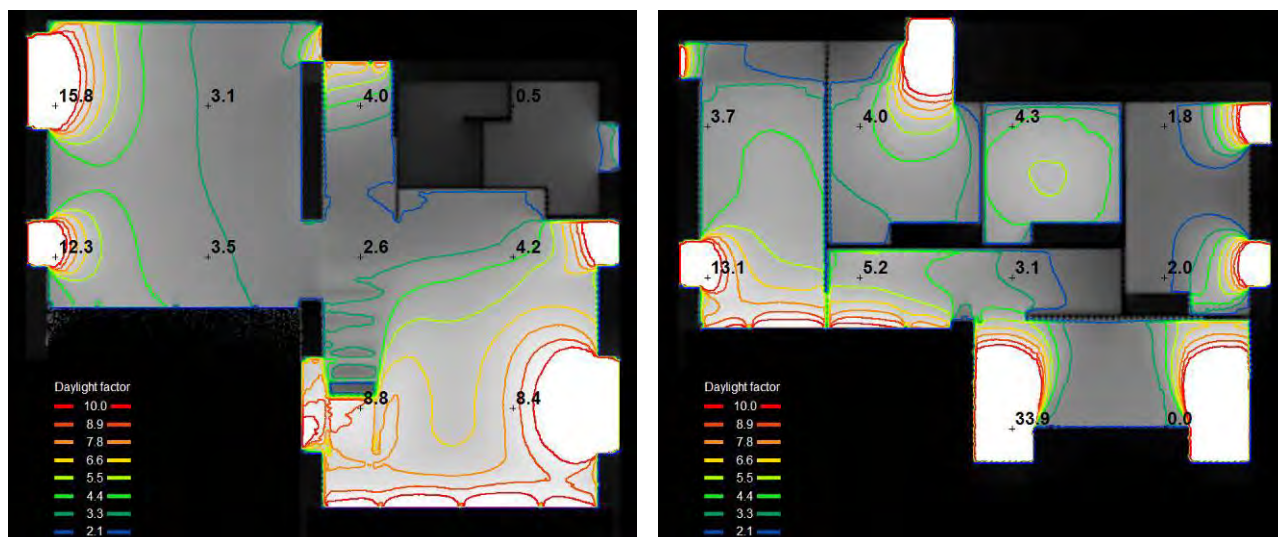


Fig. 6 Plan 1 and 2 of Home for Life with Daylight Factor (DF) curves.

Glare might occur. [11]. Family 1 (F1) pulled down the internal and external blinds to dim the light level and create privacy, which has resulted in reduction of possible solar heat gains [20].

The South facing active façade is critical in the South West facing room on first floor. F2F writes: "It is nice to have so much light in the house. The character of the light changes with the weather. However, my husband has to pull down the external sunscreen at the balcony in the office during the day. The internal blinds are not enough. Too much reflection in the computer screens makes work impossible". She adds: "Awning blinds and sun screening have started to go down later, meaning that we can enjoy the days getting longer. The timing is perfect". This accentuates the experience of the house following the rhythm of day and year.

As a contrast to the dynamic daylight in the kitchen/dining space, the bathroom on the first floor appears to have the most even daylight distribution at an appropriate high level of illumination with an average daylight factor at 4.3% and daylight factor at wash basin height around 5% [12]. This is due to the high placement of the north facing roof windows in the room which allow the daylight from the northern sky to be brought down softly to the level of the wash basin via reflections in the room.

F1 experience using very little electrical light due to level of daylight and the Anthropologist notice: *“The family has the experience that they use less electrical light than in their old house and they mention the great amount of daylight intake as one of the things they will miss the most, when they move back to their old house from the 1970s”*.

3.3.4 Fresh air and comfortable temperature

The top windows in the south facing façade and in the doors in the light cross are together with the roof windows programmed for automatic natural ventilation cultivated via the design of the spaces. In March F2F writes: *“In March we experienced that the house changed from winter to summer. The first time the house went into summer state took us by surprise. It acted differently than we were used to. The windows and roller and awning blinds went down. The air felt and smelled fresher – real outdoor air”* [17].

The house is designed with eaves to the south to provide shade for the high warm summer sun. The south facing windows are supported with external automatic sun screening and internal blinds. Temperature during the first test year was measured to be below the criteria of class 2 in EN15251 in more than 95% of the year and thereby fulfilled the active house criteria. However, the measurements and the observations indicate that there are periods especially during spring and fall and shorter periods during summer, when overheating occurs [20].

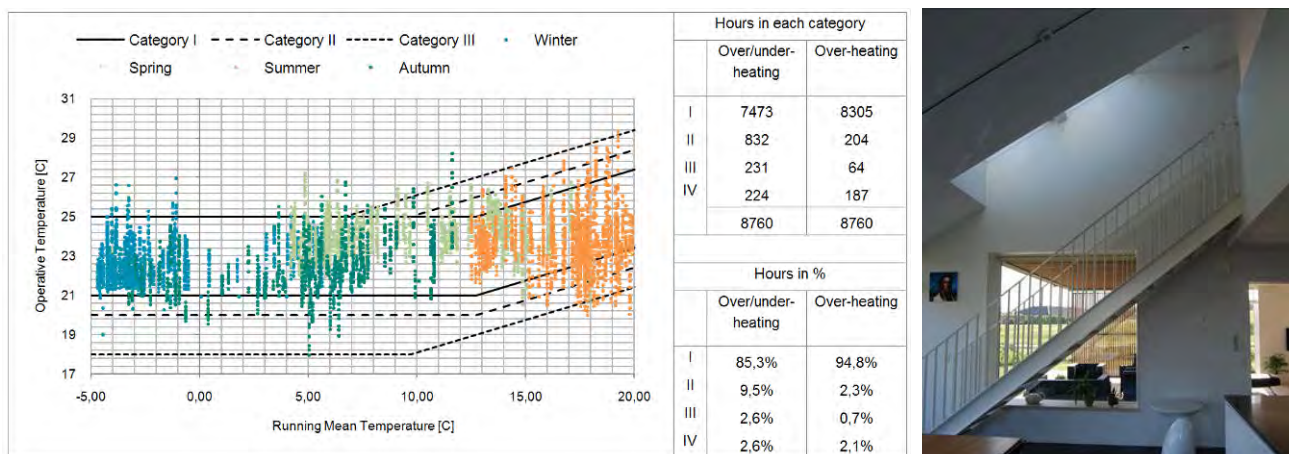


Fig. 7 EN 15251 comfort graphs created from values measured in Home for Life through first test year.

Fig. 8 Inside the kitchen/living room space. Photo: Gitte Gylling.

F2 experienced overheating primarily during winter clearly stated in the diary by F2F from December: *“A Sunday with plenty of sun and more than 27 degrees in the living room we had to have the automatic control ventilate a couple of times, but we felt more like opening all doors to outside, to the 2 degrees below freezing point. We didn’t, but sat for a while on the terrace by the living room... The house keeps the warmth, which we could benefit from later that evening and that night. It is still winter, you know”*. A couple of months later in February F2F continue: *“We had the pleasure of the sun in February. We came home late on a Saturday afternoon. It was probably 29 degrees in the living room and 27 in the kitchen. When we entered the house, we were cold, so feeling the warmth was actually very pleasant. The sun was also strong the following day. We pulled down the awning blinds in the kitchen, which instantaneously gave us a pleasant feeling, and the temperature stayed at an acceptable level around 24-25 degrees”*. The following month, March: *“The sun is higher in the sky, which we can tell by the living room temperature, which has*

not been quite so high as in January and February when the sunlight came more directly into the house". Finally, in May F2F writes: "When we experienced in January how the low sun could heat the house up to 28-29 degrees by frosty weather, we feared extensive heat in the summer half-year. However, we manage to keep a pleasant temperature. On hot days, the house feels cooler than the temperature outside. It does not take much sun to activate the sun screening and ventilation. Usually the house is prepared to provide heating, and the air in the house is always fresh". [17]

3.3.5 Solar heat gain

According to calculations the south facing window supports the house with solar heat during the heating season, the east and west facing windows are neutral, and the north facing windows are energy minus [7]. During the design of the house it was simulated that half the required energy need for heating could be covered by solar heat gain through the windows. [16]

After one and a half test year it has become clear that the actual amount of solar heat gain to support the heating of the house is not equivalent to the simulations. The difference is due to different user behaviour than expected in the simulation and that the calculation programs are not adjusted to inflexibly. Another factor is the small energy demand as the house is very well insulated.

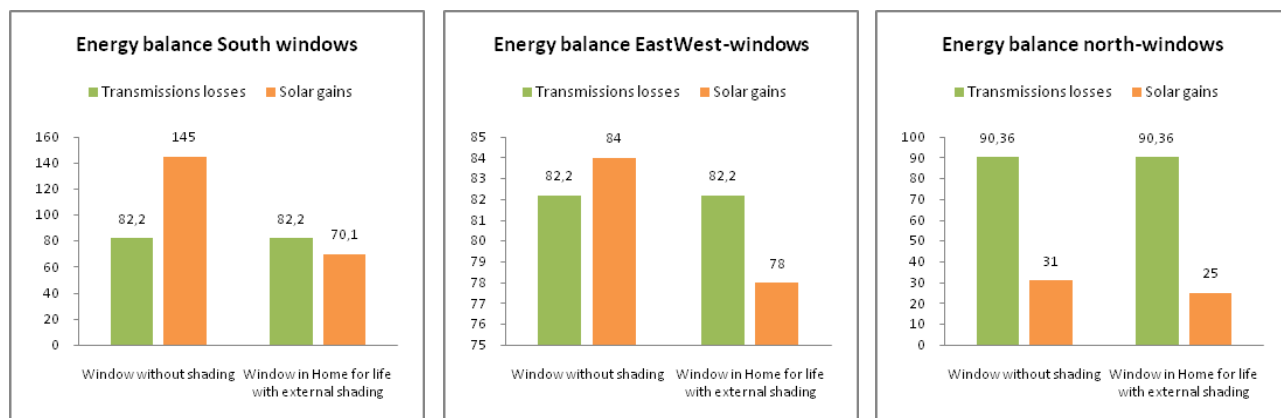


Fig. 9 Energy balance through the different windows.

F2 shows interest in the fact that the sun supports the house with energy. In November F2F writes: "We hope for a very sunny winter to support the balance of energy. 'Good weather' has a completely new meaning to us now" [17.]

4. Results

The results from the analysis are presented in Table 2.

Table 2 Results: Window design elements related to poetic and technical parameters

	South facing active façade	East and west facing windows	North facing roof windows	Light cross	
P O E T I C	Expression of space and material	<ul style="list-style-type: none"> - Modernistic motif. - Big variation of direction, reflections and shadows from daylight throughout day and year. - Light inlet moderated and equalised by external sun screening. - Black slate floor moderates reflections. 	<ul style="list-style-type: none"> - Classic window: the view as a picture on the wall. - The window recess creates a space. - The low morning and evening light creates characteristic formations. - Screening adjusts the expression in the room. 	<ul style="list-style-type: none"> - Studio window. - Diffuse and cool daylight inlet. - The light has sufficient direction to make outlines and colours distinct. - The characteristic shape of space is accentuated and opened to the north. 	<ul style="list-style-type: none"> - Classic axis. - Enlargement of spatiality across the house. - View at entry. - Transparency in house layout.
	Indoor and outdoor relations	<ul style="list-style-type: none"> - Free view of sky, terrace, garden, landscape and bay. - Floor and walls continuing outside and direct access through doors accentuates indoor/outdoor relations. - Large glazed area makes look in, interior blinds required. 	<ul style="list-style-type: none"> - Visual contact with east and west facing terraces and context. - Provides the possibility of looking through the house from east to west. 	<ul style="list-style-type: none"> - Opens the room to the sky in north, which is often illuminated directly by the sun and creates big contrasts throughout day and year. - Privacy due to no peak in possibilities. 	<ul style="list-style-type: none"> - Strong effect caused by opening the house to all four corners of the world. - Exit to terraces in all four directions.
T E C H N I C A L	Functional daylight conditions	<ul style="list-style-type: none"> - Direct high (summer) and low (winter) sunlight. - Need glare screening - Daylight inlet from other directions required to prevent glare. - Daylight level high. 	<ul style="list-style-type: none"> - Big pane with large light inlet. - Direct low sunlight in the morning and evening. - Manual screening to control light inlet. - Fine reflection of light in recesses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Well distributed light from the sky. - High DF via relatively small window areas. - Good light in shower by mirror in the bathroom. - Fine function as light source in bedrooms. - Night screening required. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contribute by distributing daylight inlet from east, west and in particular from north at the entrance.
	Fresh air and comfortable temperature	<ul style="list-style-type: none"> - Good position for fresh air = natural ventilation. - Eaves prevent direct sunlight during summer. - Automatic external sun screening and natural vent. to avoid overheating. - 100% glass not optimal for stable indoor climate. 	<ul style="list-style-type: none"> - The window has no openings = no ventilation. - Risk of temporary overheating in the morning or evening. 	<ul style="list-style-type: none"> - Good opening solution for natural ventilation. - No risk of overheating. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilation openings (east, west, south) create natural ventilation. - Relatively small glass areas with no contribution to overheating. - Screening in rooms on first floor recommended.
	Solar heat gain	<ul style="list-style-type: none"> - Energy plus despite reduction of heat contribution due to sun screening. - In practice, the glass area is not utilised 100% for solar heat gain and could be reduced. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energy neutral. - The large pane has a relatively high U-value. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energy minus due to small solar heat gain, but small window area relative to DF means only little importance for total energy contribution. - Energy loss equalised by energy plus windows in south facing roof. 	<ul style="list-style-type: none"> - Together the four doors are energy neutral.

Table 2 Results: Window design elements related to poetic and technical parameters

	South facing active façade	East and west facing windows	North facing roof windows	Light cross
P O E T I C	<ul style="list-style-type: none"> - Modernistic motif. - Big variation of direction, reflections and shadows from daylight throughout day and year. - Light inlet moderated and equalised by external sun screening. - Black slate floor moderates reflections. 	<ul style="list-style-type: none"> - Classic window: the view as a picture on the wall. - The window recess creates a space. - The low morning and evening light creates characteristic formations. - Screening adjusts the expression in the room. 	<ul style="list-style-type: none"> - Studio window. - Diffuse and cool daylight inlet. - The light has sufficient direction to make outlines and colours distinct. - The characteristic shape of space is accentuated and opened to the north. 	<ul style="list-style-type: none"> - Classic axis. - Enlargement of spatiality across the house. - View at entry. - Transparency in house layout.
I n d o o r a n d o u t d o o r r e l a t i o n s	<ul style="list-style-type: none"> - Free view of sky, terrace, garden, landscape and bay. - Floor and walls continuing outside and direct access through doors accentuates indoor/outdoor relations. - Large glazed area makes look in, interior blinds required. 	<ul style="list-style-type: none"> - Visual contact with east and west facing terraces and context. - Provides the possibility of looking through the house from east to west. 	<ul style="list-style-type: none"> - Opens the room to the sky in north, which is often illuminated directly by the sun and creates big contrasts throughout day and year. - Privacy due to no peak in possibilities. 	<ul style="list-style-type: none"> - Strong effect caused by opening the house to all four corners of the world. - Exit to terraces in all four directions.
F u n c t i o n a l d a y l i g h t c o n d i t i o n s	<ul style="list-style-type: none"> - Direct high (summer) and low (winter) sunlight. - Need glare screening - Daylight inlet from other directions required to prevent glare. - Daylight level high. 	<ul style="list-style-type: none"> - Big pane with large light inlet. - Direct low sunlight in the morning and evening. - Manual screening to control light inlet. - Fine reflection of light in recesses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Well distributed light from the sky. - High DF via relatively small window areas. - Good light in shower by mirror in the bathroom. - Fine function as light source in bedrooms. - Night screening required. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contribute by distributing daylight inlet from east, west and in particular from north at the entrance.
F r e s h a i r a n d c o m f o r t a b l e t e m p e r a t u r e	<ul style="list-style-type: none"> - Good position for fresh air = natural ventilation. - Eaves prevent direct sunlight during summer. - Automatic external sun screening and natural vent. to avoid overheating. - 100% glass not optimal for stable indoor climate. 	<ul style="list-style-type: none"> - The window has no openings = no ventilation. - Risk of temporary overheating in the morning or evening. 	<ul style="list-style-type: none"> - Good opening solution for natural ventilation. - No risk of overheating. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilation openings (east, west, south) create natural ventilation. - Relatively small glass areas with no contribution to overheating. - Screening in rooms on first floor recommended.
S o l a r h e a t g a i n	<ul style="list-style-type: none"> - Energy plus despite reduction of heat contribution due to sun screening. - In practice, the glass area is not utilised 100% for solar heat gain and could be reduced. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energy neutral. - The large pane has a relatively high U-value. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energy minus due to small solar heat gain, but small window area relative to DF means only little importance for total energy contribution. - Energy loss equalised by energy plus windows in south facing roof. 	<ul style="list-style-type: none"> - Together the four doors are energy neutral.

Table 3 Conclusions presented in table form. The table present where the window is used as a poetic device and a technical tool.

	South facing active façade	East and west facing windows	North facing roof windows	Light cross	
P O E T I C	Expression of space and material	+	++	++	+
	Indoor and outdoor relations	++	++	+	+
T E C H N I C A L	Functional daylight conditions	+	+	++	+
	Fresh air and comfortable temperature	+ -	+/- -	++ ++	+ +/-
	Solar heat gain	+	+/-	-	+/-

All four analyzed window design elements have potentials to provide the people living in the house with poetic qualities such as expression of space and material evoked through daylight and indoor and outdoor relations. Not all window elements are contributing with technical values in all aspects. The table illustrate the importance in illuminating the window as an intelligent and holistic design parameter since three of the four window elements have a neutral or negative energy balance and two window elements will have a negative effect on comfortable temperatures if they are not regulated by external sunscreens and natural ventilation. In this paper it is verified that the windows support the building with qualities that are basic elements in creating sustainable living environments. The hypothesis that a holistic approach to the window as a design element can be used both as a poetic device and a technical tool to improve quality of life in energy positive homes can be verified and it is clear that the poetic values have an important role in the design. These parameters do not always correspond to the technical needs.

The challenge is to develop tools, design strategies and legislation where the complex synergy between technical needs and human needs for the poetic aspects can be united by the window.

6. Acknowledgements

The authors of the paper would like to thank Brian Edwards who has been a mentor during the development of this paper.

7. References

- [1] EUROPEAN COMMISSION, "NEST project; Innovative Sensor System for Measuring Perceived Air Quality and Brand Specific Odours", Technical University, Berlin, 2007.
- [2] SLOTH, N., "Active House – a vision". Available at: www.activehouse.info. 29.07.2011.
- [3] HANSEN, E.K., "Measuring Life by Real People", 2010. Available at: <http://www.activehouse.info/knowledge/measuring-life-by-real-people>. 29.07.2011.
- [4] GYLLING, G., KNUDSTRUP, M.A., HEISELBERG, P.K., and HANSEN, E.K., "Measuring sustainable homes – a Mixed Methods approach", ARCC 2011, Detroit, 2011.
- [5] VELUX (2011). VELUX Daylight Visualizer 2. Available at: <http://viz.velux.com/>. 29.07.2011.
- [6] STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT (2006). Simulering med Bsim. Available at: <http://www.sbi.dk/indeklima/simulering> 29.07.2011.
- [7] STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT (2005). Bygningers Energibehov. Available at: <http://www.sbi.dk/miljo-og-energi/energiberegning/anvisning-213-bygningers-energibehov>
- [8] MIMA. Available at: <http://dev.mima.omega.oitudv.dk/>. 29.07.2011.
- [9] HAWKES, D., "The Environmental Imagination", Taylor and Francis Group, New York, 2008, p VI.
- [10] KVALE, S., and BRINKMANN, S., "Interview – Introduktion til et håndværk", SAGE, København, 2009.
- [11] ENTVISTLE, J.M., "Anthropological observations". Available at: <http://dev.mima.omega.oitudv.dk/>. 29.07.2011.
- [12] OSTERHAUS, W., "Notes on the Daylighting Performance of Bolig for Livet". Ingeniørhøjskolen, Århus, 2010.
- [13] RASMUSSEN, S.E., "Om at Opleve Arkitektur", Arkitektskolen, Århus, 1989.
- [14] EDWARDS, B., "Rough Guide to Sustainability", 3. ed. RIBA Publishing, London, 2010.
- [15] VELFAC, "Bolig for Livet", 2009, p 9. Available at: [http://www.velfac.dk/velfac/download.nsf/web_all/6F64A4E8050244EEC125789400377439/\\$file/Bolig_for_livet_web.pdf](http://www.velfac.dk/velfac/download.nsf/web_all/6F64A4E8050244EEC125789400377439/$file/Bolig_for_livet_web.pdf)
- [16] MIMA. Available at: <http://dev.mima.omega.oitudv.dk/projects/home-for-life/documents>. 29.07.2011.
- [17] Diaries from Bolig for Livet. Available at: <http://dev.mima.omega.oitudv.dk/projects/home-for-life/documents>. 29.07.2011.
- [18] Sammenfatning 09/10 Available at: <http://dev.mima.omega.oitudv.dk/projects/home-for-life/documents>. 29.07.2011.
- [19] Evaluation 2st year of testing Bolig for Livet. Available at: <http://dev.mima.omega.oitudv.dk/projects/home-for-life/documents>. 29.07.2011.
- [20] "Indoor climate in Bolig for Livet". Available at: <http://dev.mima.omega.oitudv.dk/projects/home-for-life/documents>. 29.07.2011.

[3]

[3] Hansen, E.K., *Dagslys og energioptimering i boligen*. 2010a, s. 34-37. I Larsen T. S., Sælan, A., Hansen, E. K., Aggerholm, S. *Energiparcel - 4 eksempler på energirenovering af danskernes yndlingsbolig*. Realia A/S. ISBN 978-87-92230-26-3

DAGSLYS OG ENERGIOPTIMERING

DAGSLYS OG ENERGIOPTIMERING I BOLIGEN

Ellen Kathrine Hansen

Parcelhuset, danskernes foretrukne boligform, viser tydeligt de seneste 50 års udvikling inden for forholdet mellem dagslys og energioptimering i boligen.

Jeg er vokset op i et parcelhus under 70'ernes oliekrise. Som de fleste efterisole-rede min far huset og opdelt den store vinkelstue, så vi kunne sidde i en mindre TV-stue og derved skrue ned for oliefyret. Konsekvenserne var, at vi frøs, og at min far råbte 'luk døren' hver gang, vi kom ind i stuen!

80'ernes nye parcelhuse blev opført med tykke, velisolerede ydermure og små vinduer med kraftige rammer og et lille glasareal – kendt som den såkaldte 'glughuls'-arkitektur. Isolering var vejen frem. Og da vinduer isolerer dårligere end en ydermur, lovgav man, at vinduer maksimalt måtte udgøre 15% af husets opvarmede areal. Det har ændret sig siden, og i dag bygger vi parcelhuse med vinduesarealer på helt op til 40% af gulvarealet.

BEDRE UDNYTTELSE AF DAGSLYS OG SOLENS VARME

Med de nye energibestemmelser til bygningsreglementet i 2006 begyndte man at beregne den samlede energiramme. Det betyder, at man ikke kun ser på, hvor meget varme man mister ud gennem vinduerne, men også medregner at vinduerne bidrager til opvarmning af huset om vinteren.

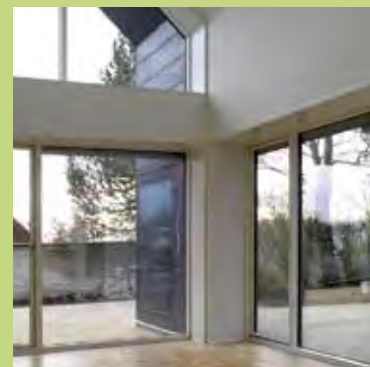
Det er meget interessant i forhold til visionen om at forene energioptimering med et bedre indeklima og en højere arkitektonisk kvalitet. Solen leverer i et vedvarende flow ca. 15.000 gange mere energi til jordkloden end vores samlede energibehov. Derfor skal vi i fremtiden blive bedre til at 'høste' solens energi i form af passiv opvarmning og som dagslysindtag i vores boliger.

Inden for de seneste år er der kommet energieffektive vinduer på markedet. De er konstrueret med fokus på at reducere energitab og udnytte solvarmen gennem vinduerne. For at optimere energitilskud og dagslysindtag er det nødvendigt at øge glasarealet og reducere karmarealet. Derfor er mange af fremtidens vinduer udviklet med smalle rammer og effektive ruder. De smalle varmeisolerede rammer og ruder – oftest af tre lag glas – er så gode, at de bidrager betydeligt til varmetilskudet. Fremtidens vinduer bliver ligefrem plus-energivinduer. De tilfører altså mere energi fra solen om vinteren, og endnu mere i det tidlige forår og det sene efterår, end de afgiver. Herudover leverer de dagslys, som ud over at være af høj kvalitet, erstatter en stor del af energiforbruget til kunstig belysning.

I dag er vi meget opmærksomme på at inddrage sollyset som et aktivt element i boligen. Vi kan skabe oplevelser af at følge solens evige foranderlighed henover døgnet og året og mærke solens stråler på kroppen, lade solen opvarme stengulvet eller observere, hvordan himmelset og sollyset konstant forandrer rummet. Der er ikke kuldestråling ved vinduerne som tidligere. Det giver mulighed for at indrette sig friere omkring vinduerne. Man kan placere senge og opholdspladser under vinduer uden at føle træk. Alt dette giver mulighed for at udnytte arealet langt mere effektivt. Samtidig kan den åbenhed, der skabes ved vinduerne, give huset nye rumlige dimensioner.

OPTIMERET DAGSLYS

Prototypehusets dobbelthøje rum med oventlys betyder en ny oplevelse af rumlighed samt himmellys til køkken-alrummet. En større åbning og direkte udgang i glas mod vest giver bedre, direkte kontakt til haven, og i sydfacaden er der åbnet op i stueplan, mens tagudhængen stadig skærmer for den varme sommersol.



SOLSKORSTEN

Den centrale solskorsten i orange glas giver huset sin helt egen karakter og bidrager med farvet himmel- og sollys eftermiddag og aften samt med frisk luft via naturlig ventilation, også når det regner.



DAGSLYS OG ENERGIPTIMERING

SUNDT INDEKLIMA OG FORHØJET LIVSKVALITET

En anden væsentlig parameter for livskvaliteten i vores bolig er indeklima og sundhed. Vi tilbringer 90 % af vores tid inden døre, og vi har meget brug for at opleve dagslysets rytme, for at vores fysiologiske ur følger døgnrytmen, ligesom dagslyset og kontakten til omgivelserne modvirker depression. Vinduernes placering skal fremme muligheden for at ventilere, så vi sikrer et flow af frisk luft i vores tætte moderne boliger og derved skaber et sundere indeklima, der bl.a. modvirker astma og allergi.

KONKRETE OG PRAKTISKE EKSPERIMENTER

I projektforsøget i Energiparcel har ovenstående elementer spillet en central rolle i diskussionerne om, hvordan man ved renovering på én gang kan energioptimere og samtidig opgradere husene, så energitiltagene bidrager med nye kvaliteter til boligen. Energiberegninger blev fremlagt parallelt med dagslysanimationer og rumlige illustrationer af de transformationer, som rummene kunne tage. Begrebet 'non energy benefit' (gevinster, som ikke direkte har med energibesparelser at gøre) blev introduceret parallelt med beskrivelser af, hvordan de forskellige virkemidler påvirkede såvel energiforbruget som komforten og oplevelsen af at være i huset.

Alle husene fik udskiftet til nye energioptimerede vinduer. I huset på Farøvænget er der, udover udskiftning af vinduer, arbejdet med at trække lyset helt ind i hjertet af bygningen via ovenlysvinduer. Det skaber en helt ny lys og åben rumlighed, som styrkes af, at skorstenen centralt i huset er fjernet. Det giver uhindret udsigt til haven, som herved trækkes tættere ind i stuen. I gavlen mod øst er glaspartiet rykket frem i facaden og brystningerne udskiftet med ruder, så der opstår et stort vindue, der går helt ned til gulvet og forsyner huset med mere lys fra øst. Samtidig inddrages dette område af stuen som en del af den opvarmede bolig, og to ydervægge 'forsvinder'.

I Prototypet huset på Langøvænget 8 er der helt konsekvent arbejdet med, hvor langt man kan gå med energioptimering ved at benytte integreret energidesign. Et af tre energioptimeringshovedtiltag er 'optimeret dagslysudnyttelse'. Her arbejdes der med passiv solvarme, balanceret dagslys, minimering af forbruget til belysning, skabelse af rumlige sammenhænge mellem inde og ude og endelig med naturlig ventilation.

Energiparcelns fire renoverede huse viser vejen for, hvordan vi i fremtiden kan udnytte solens lys og energi langt bedre i vores boliger. Husene demonstrerer, hvordan energioptimering også kan tilføre vores boliger nye kvaliteter. Dagslyset bliver midlet til at skabe en åbenhed og mere kvalitativ rumlighed, uden at bygge nye arealer, men blot ved at åbne op mellem etager, i taget eller i facaden.

Fælles for Energiparcel-husene er, at de ikke er teoretiske skrivebordsprojekter, men praktisk gennemførte eksperimenter, der er udviklet og udført med omtanke for de mennesker, de danner hjem omkring. Erfaringerne, der nu høstes om familiernes oplevelser og forbrugsmønstre, bliver den vigtigste kilde til at vise os, hvordan vi skal energirenovere vores mange parcelhuse.

Der er vist et ordsprog, der siger 'du bliver, som du bor', så lad Energiparcel vise vejen til at bringe masser af dagslys og frisk luft ind i vores foretrukne boligform – fri os fra glughuls-arkitektur, kolde stuer, og at jeg skal råbe 'luk døren' efter mine børn.

FRA GLEMT TERRASSE TIL PLAYSTATION-ARENA

Parcelhuse fra 70'erne kan ofte nemt tilpasses det moderne liv. Nogle ting er dog svære at gøre noget ved, f.eks. er mange børneværelser ganske små, men på Farøvænget er det lykkedes både at forbedre energiforbruget og skaffe mere plads.

En overdækket terrasse inddrages til stuen ved at rykke et nyt superlavenergi-vinduesparti frem i gavlen. Husets facade bliver mindre, og det nye areal ligger tæt ved børneværelserne. Det følger en aktuel tendens: De fleste aktiviteter foregår i fællesrummene sammen med familien, mens værelserne primært bruges som soverum og privat samvær med vennerne.



DAGSLYS OG ENERGIPTIMERING



[4]


[4] Hansen, E.K. 2010b, *Denmark's net-zero energy home*. In IEEE Spectrum Technology, The Magazine of Technology Insiders Engineering and Science News, Vol. 47, no. 8.10 p. 34-38, The Institute of Electrical Engineers, Inc. New York, U.S.A.

Home, Smart Home

**A Danish experiment field-tests a sentient,
carbon-neutral house for the masses**

BY ELLEN KATHRINE HANSEN





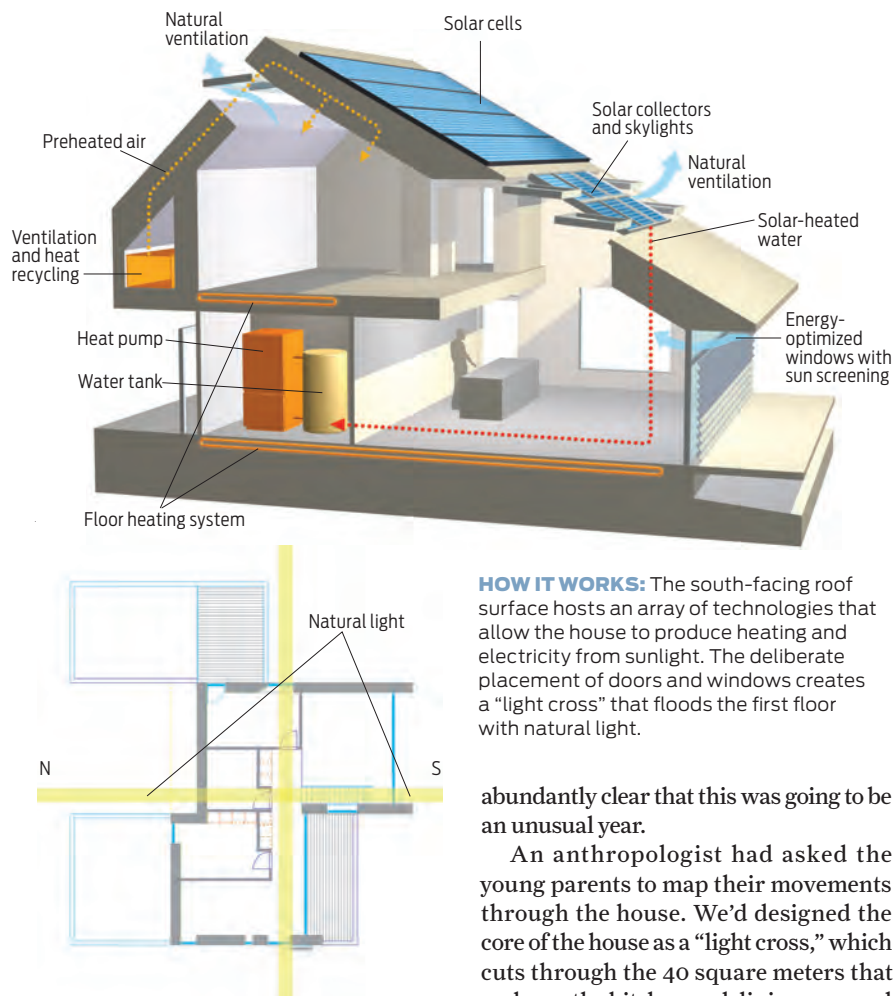
JUDGING BY LOOKS ALONE, you'd never guess that the simple one-and-a-half-story house on a residential street outside Århus, Denmark, is anything more than an ordinary single-family home. The stylish little house has the broad windows and long sloping roof of a typical Scandinavian home; a trampoline sits on the neatly trimmed lawn.

But this house is different. Using ecologically benign materials, a rooftop of solar panels, and energy-scrimping designs, the house generates more than enough power to run itself.

Inside, a family of five is testing out the ultimate model home. Windows in all four walls and a slanted skylight flood the first floor with sunshine. Built-in blinds twitch autonomously to adjust to the glare, angling their slats just so. To bring in more fresh air, the skylight slides open with a hiss. "It's fun to listen to," the children report.

The family is now nearing the end of its 14-month sojourn in the Home for Life, the first prototype of a Danish concept known as an "Active House." At this point they no longer really notice the house's impressive array of technologies or its subtle machinations as it works to secure their comfort. Specialized windows, tight insulation, and a climate-control system minimize the need for electricity and heating. The sun handles the rest: Solar panels, solar thermal collectors, and the Home for Life's south-facing orientation allow the house to generate enough electricity and heat to make it carbon neutral. What's more, the use of building materials that can be produced with less energy means that the emissions from their manufacturing will be canceled out in about 40 years.

As the lead architect and project manager on this house, I worked closely with engineers, architects, and window specialists to make sure that every design decision took the energy plan into consideration and that every technical requirement was framed in terms of



HOW IT WORKS: The south-facing roof surface hosts an array of technologies that allow the house to produce heating and electricity from sunlight. The deliberate placement of doors and windows creates a "light cross" that floods the first floor with natural light.

abundantly clear that this was going to be an unusual year.

An anthropologist had asked the young parents to map their movements through the house. We'd designed the core of the house as a "light cross," which cuts through the 40 square meters that make up the kitchen and dining area and the living room, and we wanted to know if this design worked for the family. To minimize the need for artificial lighting, we designed the space so that daylight pours in from all four points of the cross, which also serve as exits, ventilation openings, seating recesses, and frames around a view. The family's records showed that they were indeed content to spend the bulk of their time in the light cross.

We needed the Simonsens' reflections because the raw data tell an incomplete story. Just looking at the numbers, the summer months were spectacular: The house generated 800 kilowatt-hours of electricity last August, used just a bit more than half of it, and fed the rest back to the grid. But did the family actually enjoy living here? We were curious whether they were sick less often or missed fewer days of work—or not. Our test family has helped us decipher where we've succeeded and where we still have work to do.

The rationale for this holistic approach to architecture is straightforward. Many modern buildings are toxic, and they con-

aesthetics and comfort. What we came up with is a design that unites low-tech and high-tech elements. Because we've never done anything like this before, we're treating it like an experiment, including a test family to help us investigate our theories.

The house is the first of eight experiments that the company I work for, VKR Holding, based in Hørsholm, Denmark, is financing in five European countries. The goal is to reinvent the home—to build a sustainable, affordable house that uses readily available technology to negate its imprint on the environment and to promote the health and comfort of its inhabitants. Our first prototype cost about US \$700 000 to build, not including the design and planning. In July 2009, the Simonsen family moved in. And so the experiment began.

GRANTED, it's a little funny to be watched and studied this way—even by a professional anthropologist," wrote Sophie and Sverre Simonsen in their online diary last September. The Simonsens had lived in the house for 3 months, and it was already

some way too much energy. We estimate that about a third of buildings today have an unhealthy indoor climate, which can exacerbate allergies and asthma, affect a person's ability to concentrate, and even trigger depression. The built environment is also a significant energy burden—around 40 percent of an industrialized country's energy goes to its buildings. That's not surprising when you consider that we spend around 90 percent of our time indoors. But it doesn't have to be that way. One of the goals of VKR Holding, which has invested in several companies dedicated to improving the internal environments of homes, is to start turning some of those numbers around.

There are a few ways to do this. One approach is to design houses with small windows and thick walls filled with insulation; this strategy prevents the sun from overheating the interior, cuts down on air-conditioning in the summer, and reduces heat loss in the winter. But it doesn't make for a delightful living experience. The people living in one such house complained to me that it was so heavily insulated you couldn't even hear birds singing outside.

So we decided to build a house that didn't wall itself off like a fortress from the sun but instead invited sunlight and fresh air in. In a word, that means windows. Our test house has about double the window area of an ordinary Danish house. We chose specialized panes with two or three layers of glazing, which in the cooler months reduces the heat escaping from the inside while allowing lots of heat and daylight to enter. In fact, the windows alone deliver half of the heating needed in the winter.

The windows' frames also add insulation. They're made of a brand-new type of polyurethane (the stuff that foam is made of) strengthened with thin glass threads. Engineers at Velfac, a VKR subsidiary, tested more than 200 materials before finding one that was at once highly insulating and durable and had a pleasing surface finish. Because of the material's strength, a weather-resistant frame can be made with just a slim sheet of this polyurethane.

The large windows cut down on the amount of indoor lighting and mechanical ventilation needed—good news for our net-zero-energy goal. But sometimes we need to keep the interior heating in check. To do so, a roof overhang on the south side provides shade when the sun is high in the summer, and shutters and blinds on both sides of each window reg-



THE INTERIOR: A touch-screen computer display lets the family observe the house's energy performance and adjust the internal climate controls. In the kitchen, skylights slide open automatically to let in fresh air. Window blinds self-adjust to reduce glare from the sun.



THE EXTERIOR: Solar panels that produce electricity, solar collectors that capture heat, and skylights vie for space on the house's Scandinavian-style slanted roof. The facades and roof were built out of wood and slate, which require less energy to produce than other commonly used materials.

ulate the transmittance of heat and provide privacy.

To further reduce the risk of overheating, we programmed the windows to open on their own to let in fresh air. Sensors in every room track the temperature, carbon dioxide levels, and humidity, and a weather station on the roof monitors outside conditions. Our control system, from another VKR company, WindowMaster, uses that infor-

mation to decide when to lower the solar screens or slide open selected panes. These automated adjustments of the windows, rather than traditional air-conditioning and heating, provide the bulk of the house's temperature control.

Unfortunately, the settings we chose didn't always agree with the Simonsens. As the parents reported, "The windows are open even though we feel cold. There is a draft, so we wrap ourselves in blan-

kets and close the windows with the remote control...but alas, half an hour later they open automatically again!"

It took several months for the family to adjust to their Active House. On first entering, a casual observer might be taken aback by the house's autonomy. The sound of the shutters adjusting or a window sliding open can make the house seem eerily sentient. One of the challenges we faced was balancing the need

CLOCKWISE FROM TOP LEFT: MORTEN FALBERG; FOTOGRAFI: NICHAELE FRANKE; ADAM MØRKH (2); MARTIN DIRLØV; MADSSEN (2); ADAM MØRKH

for precise control to keep the energy demand low with the desire to hide the engineering from the inhabitants.

Sophie jotted down her reactions as the family slowly became comfortable with its animated home. Some of the house's peculiar habits persisted, though; the lights, for instance, would switch off unexpectedly, even when a room was occupied. "I rocked back and forth in the chair to ensure that the light did not go off," she wrote. "It gives a whole new meaning to 'Active House,' but from outside it probably looked pretty crazy."

SO HOW DO YOU power a self-governing house?

In total, the Home for Life ought to use about 60 percent of the energy of a traditional single-family house in Denmark: 15 kWh per square meter per year for lighting, household appliances, and running the active components of the house and 32 kWh/m² per year for hot water and heating. It's the latter where the Home for Life really stands out: Its heating consumption is just half that of an ordinary Danish home. Once all the systems are fine-tuned, we estimate that the house will generate a surplus of about 9 kWh/m² per year.

The shape of the house made a big difference. Its overall surface area was kept to a minimum because that is a major factor in heat loss. In addition, the tip of the roof is tilted to the north, which increases its surface facing south. That side of the roof is covered with solar panels, solar thermal collectors, and skylights, each of which plays an important part in determining the house's overall energy budget.

First, let's look at the electricity. The 50 m² of polycrystalline solar panels generate about 5500 kWh a year. That's 20 percent more electricity than the house needs, although in winter it does draw some power from the electricity grid. These solar cells, with 13 percent efficiency, aren't the best on the market, but they're a good compromise for the price.

Then there's the heating, which comes in through the windows or the solar thermal collectors. The 6.7 m² of collectors catch the sun's rays on copper plates installed on the lowest part of the roof. Underneath the plates, copper pipes circulate a fluid that absorbs the heat of the plates, converting 95 percent of the sun's energy into heat. The collectors can catch indirect sunlight, too, so the house still has heat on cloudy days.

Should more interior heating be needed, we use an air-source heat pump. In one common configuration of this type of pump, air passes through a heat exchanger placed outside the house to transfer the air's warmth to a liquid. The liquid travels to an electrically powered compressor inside the house, which applies pressure to raise the fluid's temperature further. In general, a heat pump is far more energy efficient than conventional oil or electric heating, and it has lower CO₂ emissions, too. But the pump's performance depends



heavily on the amount of heat contained in the air; when it's cold outside, these heat pumps aren't efficient.

To avoid that problem, we used a heat pump designed by another VKR subsidiary, Sonnenkraft, which uses the solar collectors to preheat the cold winter air before it reaches the heat pump. The pump can now easily produce 20 °C water even when the outside air is below freezing. After the liquid is compressed, the heat travels through pipes in the floors and to radiators. In all, our solar collectors and pump can produce about 8000 kWh's worth of heat a year.

Generating power and heat was only part of our design goal, though. Equally important to us was the wish to pay off the energy invested in the materials. To meet that challenge, we chose materials that require less energy to produce. We used wood for most of the construction, with a few steel beams added for load-

bearing parts of the structure. We made the facades and roof out of natural slate rather than brick, which has a larger energy footprint.

OUR CAREFUL INNOVATIONS and calculations didn't always line up with the family's preferences, however. As the weather grew colder, the Simonsens complained that they weren't warm enough. We ended up raising the temperature of the heating under the floors by 2 degrees, and we stopped lowering the room temperatures at night.

The net result was, of course, an increased energy load. Fortunately, we'd overestimated how much electricity the Simonsens would use for lighting and appliances, so we reduced our estimates for those activities from 3.5 watts per square meter to 2 W/m². Then again, they sometimes kept the blinds drawn during the day—for privacy and to reduce glare—which lowered the amount of radiation available to heat the house.

In time, though, we think the Simonsens would have kept the blinds open more as they grew to understand how the windows affected their energy consumption. We know the family recognized the house's energy performance and is proud of it. On one particularly bright day, Sverre examined the computer display in the hallway that charts the house's energy performance, and the power of the sun truly hit home. "It was obvious here on Sunday when the sun came out," he wrote in the family's diary. "I just had to go and check: Was it really affecting energy output? Yes it was! That was a real 'ta-da!' moment."

We plan to share all these observations and data with the world in a new set of metrics we're now drafting, which encompass not only theoretical energy consumption but also the environmental impact and the inhabitants' well-being. We've also begun the next three Active House experiments: Green Lighthouse, a round building on the University of Copenhagen campus, as well as two single-family homes in Austria and Germany.

The Simonsens will be moving out of the house in one month, and the Home for Life will go on the market. If the family's satisfaction is any indication, we're well on our way to proving that environmentally friendly, carbon-neutral homes make for happy, satisfied inhabitants. □

[5]

[5] Hansen, E.K., 2008a. *Den transparente energiproducerende glasfacade*, 2008b, s. 18-25. I Hansen, E.K. m.fl. *Lys+energi+arkitektur*, Arkitektskolen Aarhus

TRANSPARENS

BEGREB TIL DEFINERING AF ÆSTETISKE POTENTIALER

Af ELLEN KATHRINE HANSEN, lektor, arkitekt MAA

Transparente solceller har potentialer til at udgøre energiproducerende og klimaregulerende facadeelementer, der manipulerer med lyset og skaber helt nye sanseoplevelser, hvor glasfacadens materialitet og teknologi danner nye æstetiske udtryk.

Disse æstetiske potentialer kan beskrives gennem begrebet transparens. Begrebet har traditionelt været brugt i forbindelse med rumlig transparens. I nedenstående tekst benyttes begrebet transparens til at definere nye potentialer i facader med transparente solceller og rummet bag disse.

Først beskrives begrebet transparens, hvorefter de æstetiske potentialer i begrebets betydningslag defineres inden for den transparente glasfacade, med reference til den producerende, kommunikerende og regulerende solcelle. Endelig belyses disse potentialer gennem et studieprojekt, hvor der er arbejdet med æstetiske potentialer i transparente solceller.

BEGREBET TRANSPARENS

Transparens er et centralt begreb inden for moderne kunst og arkitektur. Begrebet er op gennem det 20. århundrede blevet udviklet og benyttet til teoretisk at definere den moderne traditions fornemmelse for form og rum. Lyset er heri en gennemgående og vigtig parameter. Begrebet kan forstås indenfor tre betydningslag; bogstavelig transparens, meningstransparens og fænomenbundet transparens.¹

Bogstavelig transparens betyder gennemsigtighed, at kunne se ind i eller igennem en bygning. En egenskab der for alvor blev mulig med modernismens introduktion af bærende stål- og jernbetonkonstruktioner lukket med lette glasfacader. Den tyske arkitekt Arthur Korn beskriver i 1929 den nye facade således: '...this window is the wall itself, or in other words, this wall is itself the window. And with this we have come to a turning point. It is something quite new compared to the achievements through the centuries...it is the disappearance of the outside wall...'. Den 'usynlige' glashud, afløste såvel muren som vinduet og revolutionerede derved vores forhold mellem inde og ude. Le Corbusier taler om at arkitekturen fik volumen frem for masse.

Ved brug af transparensbegrebet i bogstavelig forstand forstås glas som et næsten usynligt materiale. En dematerialisering af glasset, der via sin gennemsigtige/usynlige kvalitet er i stand til at give en sand gengivelse af lys, rum og volumen på 'den anden side'². Det er denne bogstavelige betydning, vi i arkitektonisk forstand oftest forbinder med begrebet transparens.

MENINGSTRANSPIRENS eller betydningsbærende transparens dækker over gennemsuelighed i såvel bygningens form, funktion og konstruktion. Ideen om 'form follows function' eller 'things being what they are' er idealer for modernismens æsteter, der bygger på at funktionen, konstruktionen og ma-



Studier i glassets perceptionelle egenskaber, workshop nov. 07, AAA

materialerne i sig selv fremkalder bygningens æstetiske udtryk. Et ideal der betegnes af de amerikanske kunstnere Robert Morris som 'presentness' (1978) og af Donald Judd som 'directness'³. Inden for arkitekturen formulerede Mies van der Rohe i 1933 de æstetiske kvaliteter i meningstransparens således: '...Simplicity of construction, clarity of tectonic means, and purity of material reflect the luminosity of original beauty. (Neumeyer, 314)⁴.

På trods af de tidlige modernisters stræben efter gennemskuelighed, renhed og klarhed i bygningernes konstruktion, teknik og materialitet bærer den tids glasfacader præg af, at man stoledede på skjulte mekaniske klimasystemer til regulering af varme- og lysindtag, samt ubegrænsede energiresourcer. Glasset var derfor den transparente hud, der blotlagde bygningens konstruktive princip, uden at fortælle om facadens funktion som lys- og klimaregulerende skærm.

FÆNOMENBUNDET TRANSPARENS blev defineret af Colin Rowe og Robert Slutzky, der i 1955 skrev 'Transparency'⁵, en af de mest betydningsfulde artikler om transparens som et udtryk for en moderne arkitekturforståelse. Rowe og Slutzky tog afsæt i de rumlige kompositioner i de kubistiske malerier, og beskrev hvordan, begrebet både bogstaveligt og fænomenbundet kan overføres til arkitektonisk transparens.

Rowe og Slutzky refererer til Gregory Kepes beskrivelse af transparens i 'Language of Vision' fra 1944. Her beskriver han ikke det transparente i traditionel forstand som noget indlysende, klart eller gennemsigtigt men derimod som noget flertydigt, hvis mange betydninger indeholder den kvalitet i gensidigt at kunne gennemtrænge flere lag uden hvert lag optisk forsvinder. Derved er transparente materialer i stand til at skabe flere forskellige rumlige tilstande/udtryk.

Billedet skaber en dybde og en sammenrækning af for-

mellem- og baggrund til en tydelig komprimeret billedstruktur. Billedet bliver 3-dimensionalt.

Rowe og Slutzky oversætter billedfladens perceptionelle 3-dimensionalitet til arkitekturen ved at vise eksempler på, at glasset kan fremkalde et spil mellem antydninger, reel gennemsigtighed og refleksioner og derved skabe helt nye 3 dimensionale forestillinger/rumlige lagdelinger. Rum og flader bliver enten lagt til eller trukket fra afhængigt af fokusering, bevægelse og belysning.

Begrebet fænomenbunden transparens blev defineret i et forsøg på at stille ikke målbare værdier overfor den traditionsorienterede målbare og matematiske analyse af arkitekturen og kunsten. Transparens som begreb skulle beskrive det sansorienterede - atmosfæren. '...evnen til med øjet at gestalte realiteter, rum, der kan flyde over hinanden, hvis opmærksomheden ændres'.

DEN TRANSPARENTE GLASFACADE

Hovedparten af moderne glasarkitektur er udviklet med henblik på at opnå visuel lethed, elegance og gennemsigtighed. En bogstavelig transparens der dematerialiserer glasset og klimaskærmen, og derved tilsidesætter de indeklimatiske og æstetiske værdier. Resultatet er for ofte problemer med regulering af indeklima og eftermontering af diverse solafskærmninger og solruder.

Nye teknologiske tiltag som klimaregulerende og energiproducerende lag i glasfacaden giver sammen med udviklingen i glasindustrien mulighed for at genoptage den tidlige modernismes 'åndelige bestræbelse' og finde helt nye dimensioner i glasfacadens væsen. Dimensioner der kan lede til langt flere muligheder end forudsat af modernismens pionerer, der introducerede begrebet transparens i arkitekturen.

TRANSPARENTE SOLCELLER

Lyset er en central parameter når transparente solceller integreres i byggeriet. Solcellen er orienteret mod sollyset, hvor den absorberer noget af lyset, og omdanner det til elektricitet. Samtidig danner den transparente solcelle et filter, der transmitterer, reflekterer eller absorberer lyset og derved giver mulighed for at guide lysindfaldet til at skabe nye rumlige effekter.

Derved kan solceller ud over at producere strøm også producere atmosfære, der skaber relationer til mennesker, producere noget i os (iflg. foregående afsnit). Solceller integreret i glasfacaden kan derfor bidrage æstetisk til arkitekturen, hvilket kan defineres inden for menings- og fænomenbunden transparens.

Den 'gennemskeelige'/meningstransparente solcelle i glasfacaden kan kommunikere om parallellen mellem energioverførslen af solens elektromagnetiske stråling i solcellen og lysets brydning gennem træernes blade, idet de kemiske processer ligner dem i fotosyntesen. Den kommunikerende solcelle.

Samtidig bliver solcellen en aktiv komponent, der via refleksion, transmission og absorption af solens stråler kan bidrage væsentligt til at regulere dagslysindtag, det termiske indeklima, udsyn og produktion af elektricitet. Den regulerende solcelle.

Som tidligere nævnt revolutionerede modernismens glasfacade vores forhold mellem inde og



Øvelse, "det kommunikerende komponent", workshop nov. 07

ude ved at skabe den 'usynlige' facade. Den solcelleintegrerede facade kan i en ny forstand skabe en tættere kontakt mellem inde og ude ved at optage og regulere naturens ressourcer i facaden og derved direkte formidle om en tættere kontakt til det naturlige klima og disse energier. Den transparente facade indeholder derved en ærlighed og gennemsækelighed som energiproducent og klimaregulator, der rækker udover det potentiale, at bygningen er energiproducerende.

Den 'fænomenbundne' solcelle⁶ formidler om oplevelsen og indlevelsen af glasfacaden over 'tid og rum'. Facadens udtryk defineres i forhold til lysets skiften over døgnets og årets rytme samt subjektets bevægelser og livet omkring facaden såvel inde som ude. Lyset vil afhængigt af orientering, indfaldsvinkel og styrke enten absorberes, transmitteres eller reflekteres i facaden. Solcellen kan via sin reflekterende, absorberende og transmitterende evne integreres i glasfacaden så den fremkaldt de ønskede optiske effekter via spillet mellem lys og skygge som en teknologisk ornamentering. Den producerende solcelle.

Ligesom Rowe og Slutzky oversætter billedfladens perceptionelle 3-dimensionalitet, kan facadens, via lysets brydning af fladen, opleves som 3-dimensional. Der ligger potentialer i at fremhæve denne perceptionelle 3-dimensionalitet. Den klimaregulerende og energiproducerende facade indeholder mange funktionelle lag, som fysisk kan konstrueres, så facaden bliver 3-dimensional, og derved opleves som forskellige rumligheder afhængigt af subjektets placering og fokusering i forhold til facaden og rummet.

De klimaregulerende lag er alle konstrueret for at styre solens energi og lysets spil i lagene. De kan skabe rumlige lagdelinger, der lægges til og trækkes fra de omgivende rum såsom gaderummet, himmelen, interiør og derved skabe forskellige rumlige tilstande alt efter hvor øjet fokuserer.

En bevidst guidning af dagslyset mellem disse parametre kan skabe en facade, hvor glassets materialitet bliver ophøjet til at have en foranderlighed og poetisk karakter, der udnytter dagslysets udtømmelige potentialer. Herved bliver den transparente solcellekomponent på en gang regulerende, kommunikerende og producerende.

CASE

Følgende gennemgås én af de tre opgavebesvarelser fra forskningsprojektet 'TRANSPARENTE SOLCELLER, fremtidens el-producerende solafskærmning'⁷, der blev afholdt januar 2004 på AAA. Opgaven er beskrevet med afsæt i bogstavelig-, menings- og fænomenbunden transparens.

Opgaven 'Det ydre i det indre'⁸ blev løst ved at montere 'solceller' på 30 x 100 mm, der på indersiden har en spejlende overflade. Solcellerne er placeret i en struktur på rudens øverste og nederst del.

Uden på facaden monteres en skærm, der er perforeret med solcellernes negative mønster, hensigten er at skærmen reflekterer det direkte sollys, der ville blive transmitteret gennem ruden, mens solcellerne belyses gennem hullerne i skærmen. Skærmen følger solens gang og har en afstand til ruden, hvilket tillader himmellys at trænge ind i rummet.

BOGSTAVELIG TRANSPARENS

Solcellernes individuelle refleksion af lys gør at glasfacaden – når solafskærmningen ikke er for – såvel indefra som udefra opleves som en helhed. Der er en flydende kontakt mellem inde og ude og glassets gennemsigtighed sløres overraskende lidt af solcellerne. Det skyldes, at solcellerne reflekterer lys og farver fra rummet, og derfor ikke fremstår som mørke kontraster til den lyse rude.



Projekt, "det ydre i det indre", fremtidens solceller, kursus, januar 2004, AAA

MENINGSTRANSPARENS

Ofte er det et problem at indpasse spejlende solceller i facaden, da de kan komme til at fremstå dominerende. Dette projekt er bygget op om ideen at udnytte refleksionen som et æstetisk potentiale, bl.a. ved at proportionere solcellerne og placere dem i komponerede rytmer på facaden. Herved kan solcellerne – evt. siliciumceller – i facaden fremstå dels som et æstetisk element, med den naturligt spejlende stoflighed de har, og dels gøre det muligt at gennemskue solcelleteknikken og derved opleve facaden som energiproducerende. I den horisontale inddeling tages der højde for øjenhøjde fra såvel stående som siddende position. Spejlenes rytme forskydes i forhold til den centrale del af facaden, hvilket giver en fin

indikering af rytmerne i etagerne. Skærmens afstand til ruden gør at lyset, der reflekteres fra solcellerne, vil lyse indersiden af skærmen op, så denne får en venlig karakter.

FÆNOMENBUNDEN TRANSPARENS

Solcellerne fremhæver det fænomen, at man kan fokusere på det nære, det fjerne eller spejlingerne i facaden, alternativt projicere lagene sammen til en ny visuel oplevelse. Her forstærker solcellerne den optiske oplevelse, idet der er tale om to spejlinger, glassets og solcellernes. Det ydre og det indre rum smelter sammen, og facaden får ud over de mange rumligheder den ekstra dimension, at man kan se rummet bagved, det nære rum, ruden (objektet) og det ydre rum. Samtidig kan

man se udsnit af sig selv i såvel glassets som solcellens spejlinger. Facaden bliver herved middel til at afspejle omgivelserne/ virkeligheden på en ny måde og skabe nye 3-dimensionale rumligheder.

Solcellerne underopdeler den ellers monotone glasfacade, og skaber en struktur, der udnytter lyset til aktivering og levendegørelse såvel af facaden som by - og arbejdsrummet. Byens-/ gaden liv og det indre liv samt skyformationer og sollysets styrke og retning vil være parametre, der er med til at tegne sig i facaden.

I sammenstillingen af det indre og det ydre rum, får rummet karakter af, på en gang at være lukket og åbent. Indefra vil spejlene fremstå relativt mørke midt på dagen, mens der i overgangen mellem dag og nat vil opstå den stærkeste effekt, idet rummene vil kunne opleves forskudt. Om aftenen vil spejlene reflektere lyset fra rummet og fremstå som lysende felter på en mørk flade og derved bryde den store mørke glasfacade. Udefra vil oplevelsen af lysets refleksioner i solcellerne og glasset opleves modsat idet refleksionerne om dagen vil være stærkest og opleves op imod en relativ mørk glasflade, hvorimod de om aftenen vil fremstå som mørkere felter mod en indefra oplyst facade.

Som i ovenstående case har vi i workshoppen LYS + ENERGI + ARKITEKTUR benyttet transparensbegrebet til at beskrive de æstetiske potentialer, der blev fremkaldt i facadeudtryk og rumlig komposition.

¹ Denne tredeling af betydninger beskrives bl.a. i Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture, Forty Adrian, New York 2000 s. 286 - 288

² Words and Buildings, Forty, Adrian, New York 2000, s 286

³ Words and Buildings, Forty, Adrian, New York 2000, s 288

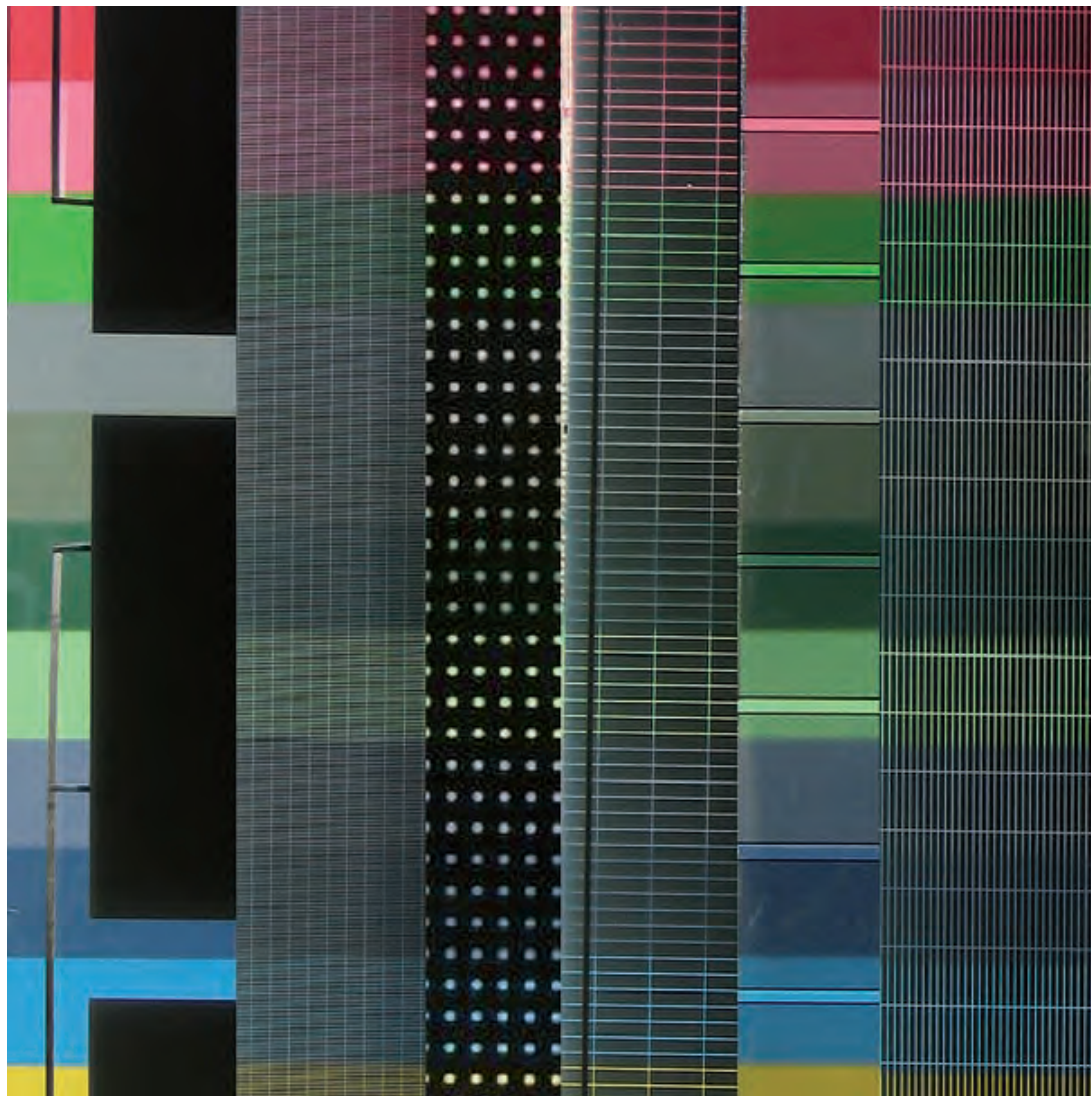
⁴ Words and Buildings, Forty, Adrian, New York 2000, s.288

⁵ 'Transparency: Literal and Phenomenal', Part 1 (1963) i Rowe, Mathematics of the Ideal Villa, 1982, 159-83. På dansk Colin Rowe & Robert Slutzky, TRANSPARENS: bogstavelig og fænomenbundet' oversat af Karin Hindsbo, i RUM analyser, red. Bek og Oxvig, 1998, 275-292

⁶ Ordet fænomen er græsk for det der kommer til syne, objektet, som det fremtræder for subjektet. Verdenen er mere end det vi får beskrevet via det fysiske og videnskaben eller i denne sammenhæng bogstavelig transparens og meningstransparens. Fænomenbunden transparens søger at lade fænomenet træde frem i sin væren - i denne sammenhæng glasfacaden i dens væsen.

⁷ Projektsamarbejdsparterne var: Teknologisk Institut, PEC group, Dansk Polymercenter, Årngstøm Solar Center, Roskilde Universitetscenter, Teknologisk Institut, Build VISION og Arkitektskolen Aarhus. Projektet var PSO-F&U finansieret og løb i perioden juni 2003 til juni 2005.

⁸ Udarbejdet af Stud. Arch. Mie Johansen, Christine Eng, Mathilde Rødbro og Kamille Le Fevre, Arkitektskolen Aarhus



Studier af solcellerudernes transparens, SBI, Juni 2007

[6]

[6] Hansen, E.K., 2008b. *Matrix, metode til karakterisering*, s.10-17. I Hansen, E.K. m.fl. "Lys+energi+arkitektur", Arkitektskolen Aarhus

MATRIX

METODE TIL KARAKTERISERING

Af ELLEN KATHRINE HANSEN, lektor, arkitekt MAA

I processen med afsøgningen af de arkitektoniske potentialer i solcelleteknologi har vi fundet behov for at udvikle nye metoder og redskaber. Vi har forsøgt at skabe en tværfaglig forståelse for værdierne lige fra målingerne i de tekniske laboratorier, over beregninger af tekniske data, teoretiske udfoldninger af begreber til definering af æstetiske potentialer til oplevelsesorienterede registreringer.

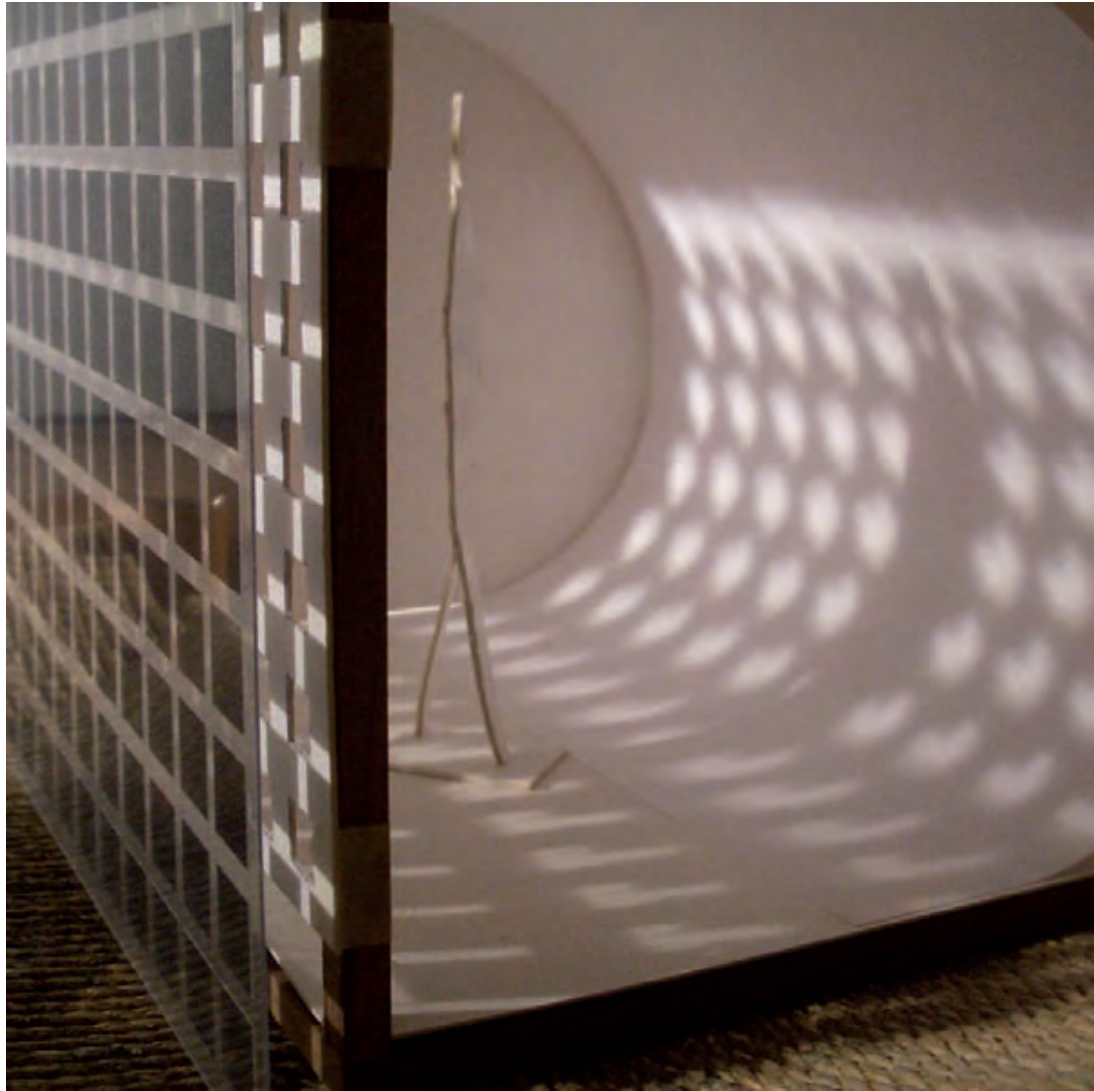
Dette kapitel beskriver en MATRIX udviklet til dette projekt samt en række begreber til at definere og sammenstille de tværfaglige værdier.

HVORFOR HAR VI UDVIKLET EN MATRIX?

En grundlæggende udfordring i frembringelsen af arkitektur er fornemmelsen for, hvordan de enkelte byggekomponenter præsenterer sig i deres omgivelser som en del af en helhed – en del af en rumlig komposition såvel som en del af facaden. Ved udvikling og bygningsintegration af nye energiteknologier er udfordringen ekstra stor. Disse teknologier bliver ofte udviklet og vurderet som monofunktionelle lag, og ikke som komponenter der skal fremtræde i en arkitektonisk sammenhæng.

Målet er at få disse tekniske og specialiserede lag udviklet til multifunktionelle lag i facaderne. Lag der tilfører flere betydninger end blot at fungere som bygningens energieffektive hud. Problemet er, at det er vanskeligt at kommunikere, og det er svært at opnå den ønskede synergi, når de tværfaglige værdier skal sammenstilles og vægtes overfor hinanden. Ofte resulterer dette i at de tekniske værdier, som nemt kan defineres og måles, bliver udgangspunkt for værdisætningerne for komponenterne, mens de æstetiske værdier ikke integreres tilstrækkeligt.

DERFOR har vi udviklet en matrix, der skal sammenstille det målte med det oplevede. Den er tænkt som et redskab til i processen at stille og besvare de rigtige spørgsmål for en mere holistisk vurdering af komponenten. Samtidig skal den fungere som et kommunikationsmiddel, hvor forskningsprojektets resultater kan systematiseres og syntetiseres, og derved på overskuelig vis beskrive hver solcellekomponent i et tværfagligt perspektiv. Tilsammen udgør en række matrix en produktoversigt, der har som mål, at beskrive egenskaberne ved transparente solceller samt vurdere hvordan vi kan indplacere fremtidens teknologiske byggekomponenter i et holistisk perspektiv og stille de ikke målbare værdier overfor de målbare.



Øvelse, "det kommunikerende rum", workshop nov. 07, AAA

MATRIX

Den udviklede matrix kortlægger tre forhold; de kommunikerende, de regulerende og de producerende værdier i de tre genstandsfelter komponent, facade og rum. Dette gøres ved at vinkelstille to akser, med henholdsvis de tre værdier og de tre genstandsfelter. Spændet i denne matrix anskueliggør de tværfaglige værdier. Derved søger vi at vurdere de forskellige komponenter mere holistisk. Metoden anskueliggør ikke mindst hvilke spørgsmål der skal stilles og besvares for karakterisering af en komponent.

I diagonalen fra venstre øverste hjørne (den regulerende komponent) til højre nederste hjørne (det producerende rum) ligger spændet mellem den fysiske (lys- og klimaregulerende) vurdering af den fysiske komponent til vurderingen af, hvad rummet producerer i mennesket, altså hvordan rummet påvirker mennesket. Fra den fysiske komponent, hvor effekten defineres, som er den traditionelle værdisætning, til hvilket indtryk komponenten gør på individet, her defineres affekten. Sidstnævnte bør være en væsentligst værdiparameter, men forbigås ofte, idet den kan være vanskelig at definere.

DE TRE GENSTANDSFELTER, FRA ENHED TIL HELHED

For at anskueliggøre komponentens egenskaber fra enhed til arkitektonisk helhed defineres tre genstandsfelter. Komponenterne skal udvikles til at skabe et samspil mellem de enkelte lag i facaden, med de sammenstillede komponenter i facaden samt med rummet bag facaden, disse tre genstandsfelter karakteriserer vi som følger:

KOMPONENTEN

Det enkelte element, der udgør et led i flere samvirkende elementer, som tilsammen udgør facaden.

Traditionelt er solcellekomponenterne udviklet med fokus på målbare værdier, som energiproduktion, pris og holdbarhed. I LYS + ENERGI + ARKITEKTUR vurderer vi komponenten, det transparente solcellepanel, integreret i et vindue.

FACADEN

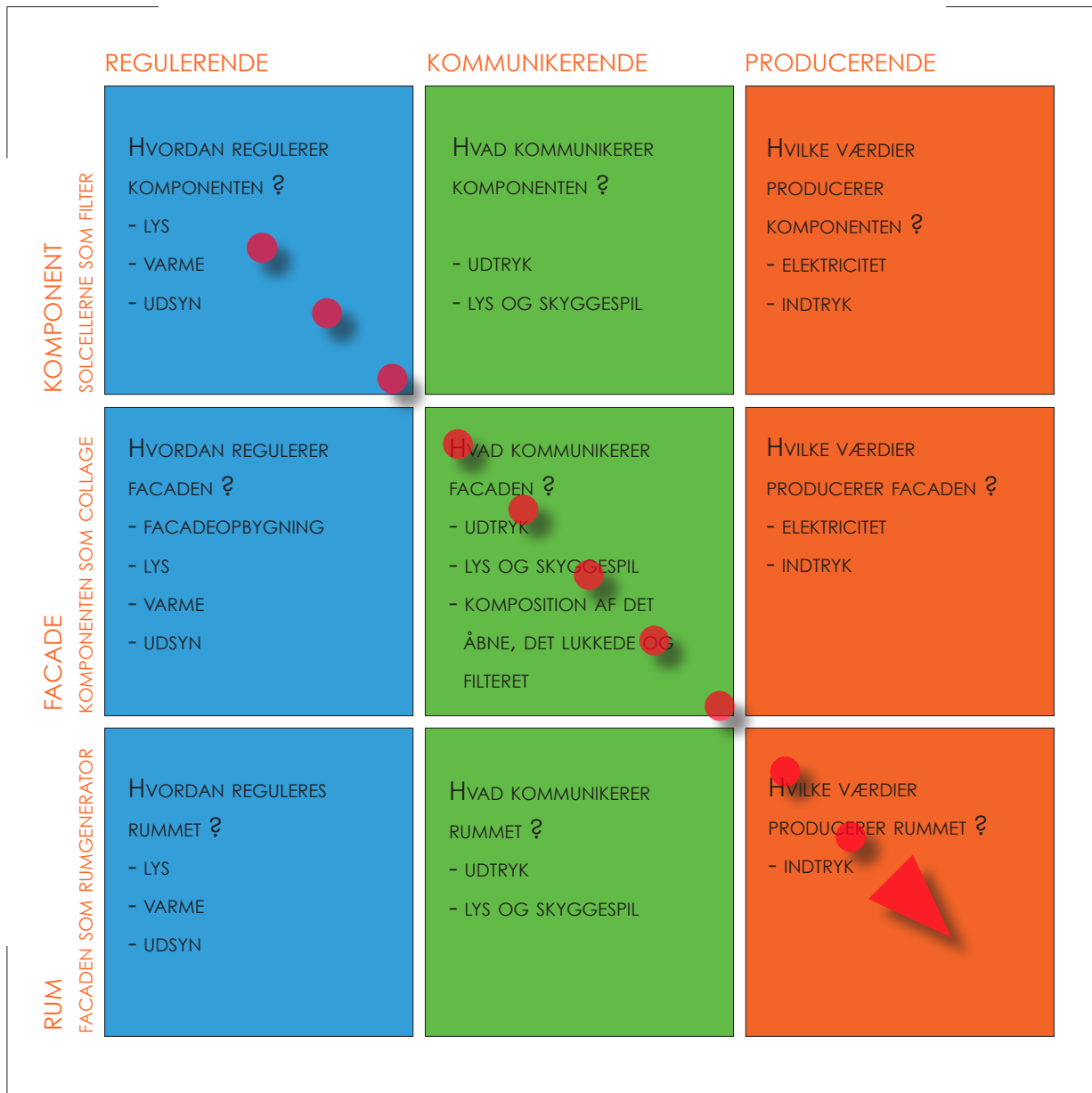
En bygnings forside, det repræsentative¹ og skærmende, bygnings beklædning. En sammenstilling/komposition/gentagelse af komponenter, deres mønstre og variationer, så der opstår et facadeudtryk oplevet udefra. Bygningens ydre. Formidler overgangen mellem inde og ude.

Traditionelt er facaden komponeret med fokus på facadens udtryk (de kommunikerende værdier). I LYS + ENERGI + ARKITEKTUR betragter vi facaden som en sydvendt facade (eller to solcellefacader der er orienteret øst, vest). I kompositionen af lukkede, åbne og lysfiltrerende (transparente solceller) komponenter bliver facaden repræsentativ som ovenfor beskrevet.

RUMMET

Rummet er det tredimensionelle, rum der opstår bag facaden. Bygningens indre.

Traditionelt er rummet skabt med fokus på funktion og den fysiske form. I LYS + ENERGI + ARKITEKTUR registrerer vi hvordan det filtrerede lys, gennem solcellekomponenten i den sydvendte facade, opleves indefra og er med til at forme rummet.



DE TRE VÆRDIPARAMETRE, FRA DET FYSISKE OVER DET OPLEVEDE TIL DET INDLEVEDE

I LYS + ENERGI + ARKITEKTUR er de transparente solcellekomponenter et ekstra specialiseret lag, der bidrager med værdier, der er både regulerende, kommunikerende og producerende. Arkitekt Finn Selmer definerer i artiklen 'Facadens Lagdeling'¹² facaden fra to forskellige synsvinkler: 'facaden opfattet som i biologisk/fysisk forstand regulerende og facaden opfattet som i semiologisk forstand kommunikerende. Vi lægger endnu et lag til nemlig facadens indvirkning på mennesket i fysiologisk og psykologisk forstand, det producerende. De tre specialiserede lag definerer vi som værdiparametre i vurderingen af solcellerne.

DE REGULERENDE VÆRDIER – EFFEKT

(fysisk udtryk for en belastning, effektivitet, måles ofte i watt)

Finn Selmer taler om den regulerende facade som 'en slags tredje hud, hvor den første er den, naturen har tildelt os, og den anden er den, der består af forskellige former for beklædning'. Den enkelte hud består af forskellige specialiserede funktionsslag, der kan reguleres. Den regulerende facade bygger på naturlovene og hvordan mennesket i samspil med naturen kan regulere indeklimaet. En natur-menneske relation, hvor facadens eksistensberettigelse er formidling af strømme af stof og energi. I mere avanceret form kan den regulerende facade afspejle en cyklisk tidsopfattelse – døgnets og årstidernes rytme.

Når vi i LYS + ENERGI + ARKITEKTUR vurderer komponent, facade og rum ud fra de regulerende værdier, er det ud fra klimatiske og brugsmæssige forudsætninger, der sikrer størst mulig komfort med mindst mulig energiforbrug, en naturvidenskabelig kvantitativ tilgang, en effektivisering. SBI har målt, hvor meget dagslys der transmitteres gennem ruden, belysningsstyrken og hvordan lyset fordeles inde i rummet. Teknologisk Institut har sammen med DTU målt/beregnet hvor meget solvarme, der transmitteres ud gennem ruden, samt hvor meget varme der transmitteres ind gennem ruden (g-værdi), afhængig af hvor godt ruden isolerer (U-værdi). Endelig har Teknologisk Institut udarbejdet en energiberegning, der definerer det samlede brutto energiforbrug, dvs. både produktion og forbrug.

DE KOMMUNIKERENDE VÆRDIER

Den kommunikerende facade omhandler ifølge Finn Selmer en menneske-menneske relation, et samspil mellem mennesker. Den kommunikerende facade informerer, og giver mulighed for betydningsudveksling. Det kommunikerende aspekt i facaden tager ifølge Finn Selmer afsæt i selve stoffet og principper for dets sammenføring, som ved tavs tilstedeværelse appellerer til umiddelbare sanseoplevelser. Fletning, stabling og sammenbinding af materialet bærer kimen til ornamentet. Her gives facaden et særligt udtryk, et udtryk der vokser ud af selve det håndværksmæssige fremstillingsprincip. Det bundne ornament. En forankring i det naturgivnes umiddelbare sanselighed. Det nærværende.

I LYS + ENERGI + ARKITEKTUR er det glassets tekstur og solcellernes ornamentering, der udgør det bundne ornament. 'Ornamentet' iscenesættes så det får forskellige udtryk afhængig af lysets refleksioner og skyggevirkninger i komponenten og af, sammenstilling med andre komponenter samt i samspil med rummet.

I LYS + ENERGI + ARKITEKTUR defineres i workshoppen, der blev afholdt på AAA i november 07, tre indledende øvelser, de kommunikerende værdier, for hhv. komponenten, facaden og rummet. Ud over de nærværende oplevelser af hvordan komponenten kommer til udtryk via samspillet med lys, er solcellens teknologi meget lig fotosyntesen, idet solens stråler også her absorberes og omdannes til en brugbar energiform. I lighed med fotosyntesen kan solcellers aktivitet gøres læsbar, og derved kan solcellen kommunikere om energioverførslen fra solens elektromagnetiske stråler til elektricitet.

Komponenten kommunikerer både udadtil og indadtil, samtidig med at den har et forhold til rummet. Derved skabes en sammenhæng, et spændingsfelt, som vi i projektet har forsøgt at afsøge via fotoregistreringer.

DE PRODUCERENDE VÆRDIER

Ud over den elektricitet solcellerne producerer, skal denne værdisætning karakterisere hvordan komponenten, facaden og rummet påvirker menneskers følelse af komfort. Vi taler om at rummet producerer atmosfære.

Det er parametre, der er meget svære at håndtere og derfor sjældent fremhævet i teknisk sammenhæng, men de er i bund og grund de væsentligste ud fra en arkitektonisk forståelse. Her taler vi om hvilke indtryk, indvirkning eller indflydelse omgivelserne har på mennesket. De transparente solceller kan transmittere sollys ind i rummet, hvilket har stor indflydelse på menneskers velvære, trivsel og sundhed.

Rent fysiologisk er det bevist, at sollys, herunder det filtrerede lys indenfor rimelige mængder, er det bedste naturmiddel for vores helbred. Et romersk ordsprog siger: 'Hvor solen ikke kommer, kommer lægen'¹³.

Fysikeren Niels Finsen modtog i 1902 Nobel Prisen for opdagelsen af, at de ultraviolette stråler i solen kunne helbrede tuberkulose. Opdagelsen byggede på en tidligere påvisning af, at sollys dræber bakterier. Solens bestråling af huden øger produktionen af D-vitamin, som er essentiel for en lang række helbreds faktorer.

Det har længe været kendt, at lyset har en effekt på vores psykiske tilstand. Melankoli er et psykologisk udtryk for en følelsesmæssig nedtrykt tilstand med tungsind og mørke. Ligesom vinterdepression, SAD (Seasonal Affektive Disorder), er en følge af for lidt lys.

For nylig er det videnskabeligt påvist, at dagslyset påvirker vores 24 timers cyklus gennem øjets lysfølsomme celler, der har indflydelse på hjernens biologiske ur.⁴ Ligesom solen gennem øjet påvirker hormonale og biokemiske processer i kroppen.

Ovenstående fysiologiske og mentale påvirkninger er blot et lille udsnit af nogle af de mange indikatorer, der er for, hvor meget der er på spil i mennesket, når vi påvirkes af vores omgivelser. Herudover er der de psykiske aspekter, der beskriver, hvilke emotioner der leder til en affekt, en følelsesmæssig tilstand individet kommer i forårsaget af en ydre situation. Rummet gør indtryk på individet.

Det atmosfæriske beskriver den vekselvirkning der opstår mellem subjekt og objekt. Atmosfæren er noget vi fornemmer, noget vi berøres af følelsesmæssigt. Det vi forstår ved at befinde os i en omgivelse.^{5,6}

Solcellen kan her præsentere sig, træde frem i sine omgivelser på en bestemt måde, i bestemte former. Scenesættelsen af solcellekomponenten præger omgivelserne, den træder udenfor sig selv, og fremviser et nærvær med omgivelserne. Atmosfæren kan ikke bestemmes, men oplevelsen af den kan beskrives.

I LYS + ENERGI + ARKITEKTUR har vi observeret de producerende værdier (atmosfæren) gennem vores kropslige nærvær, idet vi fornemmer, hvordan vi befinder os i rummene. I workshoppen udvikledes derfor rumstore arkitektoner som man kan 'være i' og lade sig påvirke af, ligesom vi kan invitere andre til at være i disse rum, og afdække hvilken indflydelse rummene har på dem. Denne oplevelsesorienterede tilgang, bygger udelukkende på sansemæssige observationer og registreringer af erfaringer med at opholde sig i rummet. Dette dokumenteres via billeder og ord.

I beskrivelsen af det producerende rum er det uomgængeligt at benytte begrebet æstetik som en iagttagelse, en fornemmelse for tingenes væsen. Hvor vi i den kommunikerende solcelle taler om den ydre fremtrædelse 'overfladen' eller ' huden', taler vi her om en sanselig nydelse, oplevelsesnærhed, emotionel indsigt, medlevelse, relevans og indlevelse.

Æstetikken kan i sit væsen mediere mellem form og stof med henblik på at gøre abstrakte problemstillinger konkrete og specifikke erfaringer almene. Heraf kan vi aflede, at den dag vi formår at mediere udnyttelsen af solens energi via solcelleteknologi i et æstetisk udtryk, er vi nået meget langt i diskussionen om at integrere energiteknologi i arkitekturen.

1 *Det repræsentative*, er udfoldet af arkitekturteoretikeren Kenneth Frampton

2 *Facaden, teori og praksis*, Kunstakademiets Arkitektskoles Forlag 2003, s. 15-25

3 *Light and Life From the Sun*, Richard Hobday, *Daylight & Architecture*, Issue 06 s. 16

4 *Lys, sundhed og velvære*, Jens Christoffersen, SBI, www.lysnet.com

5 *Urbane atmosfærer*, Niels Albertsen, *Sociologi i dag* nr. 4, 1999 s.7

6 *Oplevelsens Glossar, Æstetik*, AAU, Inst. For Kommunikation, www.aau.dk/oplevelser/aestetik.htm



Øvelse, "det kommunikerende rum", workshop nov. 07, AAA

[7]

[7] Hansen, E.K. 2008c. *Solceller – et udviklingsperspektiv*, s. 26-29, 4 s. I Hansen, E.K. m.fl. *Lys+energi+arkitektur*, Arkitektskolen Aarhus

SOLCELLER

Et Udviklingsperspektiv

Af ELLEN KATHRINE HANSEN, lektor, arkitekt MAA

Solceller er halvledere der omsætter sollyset direkte til elektricitet ved hjælp af den fotovoltaiske effekt, en cirkulation af positive og negative ladninger, uden nogen form for bevægelse, støj, slid eller affaldsprodukt.

KRYSTALLINSK SILICIUM SOLCELLER

De klassiske og mest udbredte solceller er de krystallinske solceller. De består af højrønt silicium, der er skåret i tynde skiver, de såkaldte wafers. Fra disse wafers produceres solcellerne. Langt de fleste solceller sælges ikke til slutbrugeren som enkelte celler, men som solcellemoduler, hvor flere celler til en elektrisk enhed er indkapslet.

Krystallinske solceller findes i mono- og polykrystallinsk form. De polykrystallinske solceller består af mange krystaller, og er derfor billigere at fremstille end de monokrystallinske, der består af en krystal, som til gengæld giver en noget højere energiproduktion. Silicium wafers er normalt fuldstændig lysblokerende. For at opnå en transparens i solcellemodulerne arbejdes der derfor ofte med at placere solcellerne med mellemrum i glasruder. Alternativt kan der skæres huller og mønstrer i solcellerne så lys også filtreres gennem selve cellen. Ved denne metode fjernes imidlertid noget af det solcelleaktive materiale og strømproduktionen falder tilsvarende.

Krystallinske siliciumceller udgør pt. 90% af markedet.

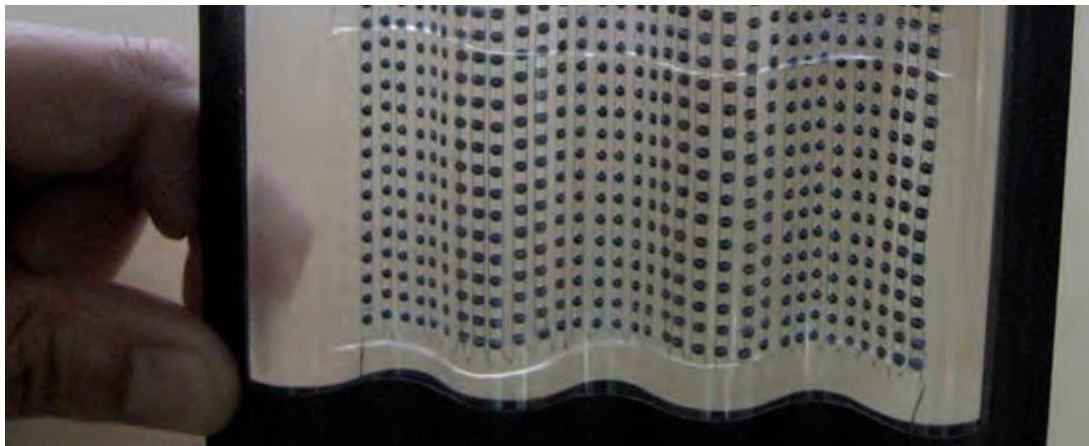
Komponenten i dette projekt fra Gaia Solar består af polykrystallinsk silicium. Gaia Solar har arbejdet med at fastgøre solcellerne på det inderste lag glas i en to-lags rude. Traditionelt er solcellerne lamineret mellem to lag glas, der udgør den yderste rude i en tolagsrude.

TYNDFILMSOLCELLER

Tyndfilmceller er en nyere type solceller, der i disse år for alvor kommer på markedet. Tyndfilmcellerne fremstilles ved at det solcelle aktive materiale lægges direkte på et underlag, hvorefter hele strukturen indkapsles. Ved ikke at udvikle hele wafers, spares en del af leddene i produktionsprocessen sam-



Polykrystalinske silicium wafers



Kyosemis bud på fremtidens solcelle; små kugler forbundet af elektriske ledere

tidig er udnyttelsen af det dyre solcelle-aktive materiale højere i tyndfilmsprocessen end i den wafer-baserede proces. Derfor anses tyndfilmprocessen som en vigtig vej frem mod billigere solceller.

Langt de fleste tyndfilmsmoduler fremstår lysblokkerende, men der er i løbet af de sidste år kommet en lille håndfuld lystransmitterende tyndfilmsmoduler på markedet. Disse produkter er lystransmitterende, fordi der er ridset et meget fint og gennemgående mønster i det solcelle-aktive materiale, og da mønsteret er meget småt fremstår panelerne på afstand translucente.

Tyndfilmsolceller kan produceres fra flere forskellige halvleder-materialer hvor de vigtigste p.t. er: amorf silicium, CIS/CIGS (Kobber-indium-(gallium)-diselenid) og CdTe (cadmium telluride).

Mest udbredte er amorfe silicium solceller, som i dette projekt er repræsenteret med de lystransmitterende komponenter fra MSK, Schott Solar, GSK og PhotoSolar, mens komponenterne fra Würth Solar er mønstrede CIS paneler.

Markedsandelen af tyndfilmceller er i dag ca. 10%, men forventes at vokse til 20% i 2010 og til over 30% på længere sigt.

FREMTIDEN

Forbedring af dagens solceller samt udvikling af nye typer solceller er et stort og vigtigt indsatsområde inden for forskning og udvikling, både nationalt og internationalt. Fokus er at reducere prisen og øge udbredelsen af solcelle-produceret el. Dette er en langsigtet og kompliceret indsats, og resultatet forventes ikke at være et "kvantespring" i solcellernes pris eller ydelse, men en gradvis forbedring af dagens celler samt en introduktion af nye typer solceller på markedet over de næste 10 år. De

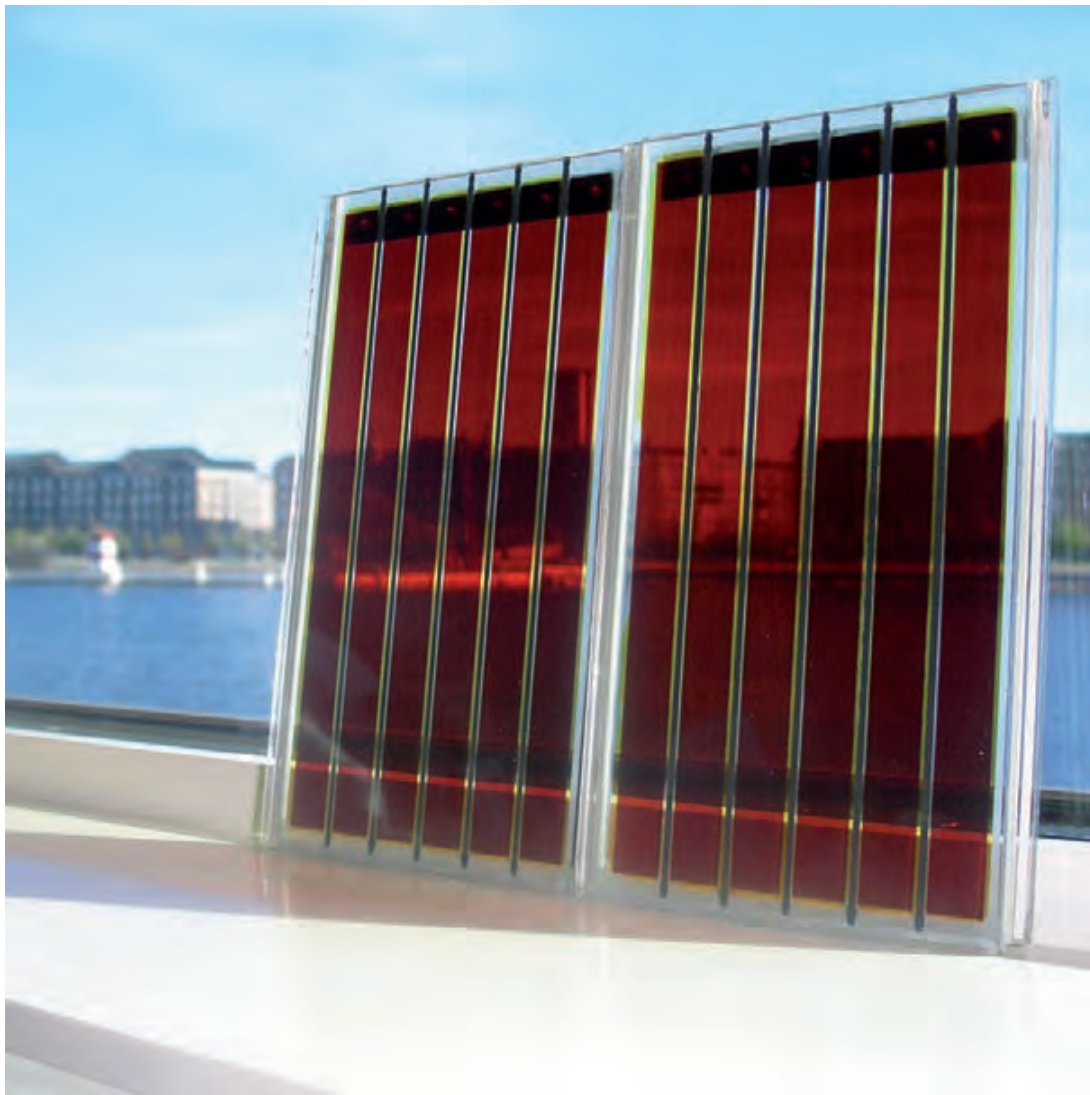
nye solceller vil adskille sig fra de solceller vi kender i dag ved at være billigere, ved at have et anderledes visuelt udtryk eller ved at have en højere ydelse.

Det globale marked indenfor solcelleteknologi er ekspanderet indenfor det sidste årti, voksende med næsten 50 % om året i de sidste 5 år. Solcelleteknologi bliver ved med at reducere prisen med historisk hastighed. Produktionsomkostningerne forventes i 2013 at ligge på omkring 1 euro/Wp. EU's vision er at solcellestrøm i 2030 udgør 4 % af verdens samlede energiforbrug.¹

Solceller er i dag stadig for dyre at integrere i byggeriet økonomisk set. Derfor er der i flere lande lavet ordninger om offentlig støtte til installation af solcelleanlæg. Dette har vist sig at være den vigtigste markedsstimulering. En anden billigørelse af solceller vil være at udvikle byggekomponenter, hvor solceller er integreret i standardprodukter. Dette er temaet i 'SOL-IND projektet', hvor Skanska, PA Energy, Energi Midt og Arkitekt skolen Aarhus udvikler industrielt fremstillede komponenter til fremtidens præfabrikerede boliger.

Parallelt med den økonomiske udvikling er det vigtigt, at der skabes fokus på de arkitektoniske potentialer i såvel udviklingen af komponenter som nye strategier for, hvordan de kan integreres i byggeriet. Dette er hovedtesen i denne publikation. Vi vil gerne vise, at de transparente solcellepaneler får helt nye potentialer, når de ses i sammenhæng med en arkitektonisk udformning af facade samt rumlighed. Vi håber derved at give udviklingen et skub i den rigtige retning, såvel med hensyn til arkitektens potentialer som ud fra betragtninger om energiop-timering.

¹ A Vision for Photovoltaic Technology, European Commission (PV-TRAC)



Dye sensitized solcelle (DSC) fra Great Cell

[8]

[8] Hansen, E.K., 2005. *Udvikling og visioner*. s.81-99. I Berg, M., Hansen, E.K., Kappel, K., Lehrskov, H., *Solceller + arkitektur - en guide til anvendelse af solceller i byggeriet*, Arkitektens Forlag. København



Solcelleteknologien er i rivende udvikling. Udbuddet af celletyper, modulstørrelser, former, farver og produkter er stort og usammenhængende. I dette kapitel gennemgås nogle af de tekniske, industrielle og arkitektoniske udviklings- og forskningsaktiviteter, der arbejder for at forbedre fremtidens bygningsintegrerede solceller.



På Danmarks designskole har en studerende arbejdet med at føre de elektriske ledere på solcellen i mønstre, der får solcellen til at fremstå tredimensionel.

UDVIKLING AF SOLCELLETEKNOLOGIER

Hovedparten af de solceller, der bruges til bygningsintegration i dag, er siliciumceller. Disse celler har en relativ høj ydelse og holdbarhed, men fremstillingsprocessen er kompliceret og produktionsapparat dyrt, hvilket gør det vanskeligere at tilpasse produktet til bygningsintegration.

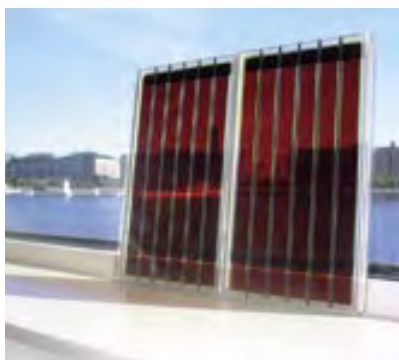
Alligevel er der meget fokus på at fremstille rentable siliciumceller i forskellige designs. De enkelte celler kan varieres i både farve, form, transparens og via placeringen af de elektriske ledere.

Det er antireflekslaget ovenpå siliciumcellerne, der giver dem farve. I dag produceres cellerne primært med antireflekslag der fremkalder de karakteristiske blå nuancer. Men der er også udviklet celler med grønne, gyldne, brune og lilla nuancer. Disse celler er ikke helt så effektive som de blå. Det er også muligt at benytte de originale og mere neutrale matte og sølvgrå (polykrystallinske) eller mørkegrå (monokrystallinske) solceller uden antireflekslag.

Cellerne kan perforeres med mikroskopiske huller og derved fremstå transparente, hvilket kan udnyttes arkitektonisk med stor effekt. Disse celler er relativt dyre og deres ydelse forringes, idet 'hullerne' ikke yder noget.

Endelig kan de elektriske ledere på cellerne varieres, enten ved at føre dem på bagsiden af solcellerne, så siliciumstrukturen på forsiden slet ikke brydes af metalstriber, eller ved at føre lederne så de danner et mønster. Sidstnævnte motiv har en studerende ved Danmarks Designskole brugt i sit forslag til en solcelle. I forslaget er lederne formet så de giver en optisk tredimensionel effekt på forsiden af cellens siliciumflade. Når cellerne sættes sammen på panelet opstår der således en ekstra dimension i anlæggets æstetisk udtryk.

I fremtiden vil den øgede efterspørgsel på siliciumceller til bygningsintegration formentlig fremme udviklingen af solceller med forskellige udtryk.



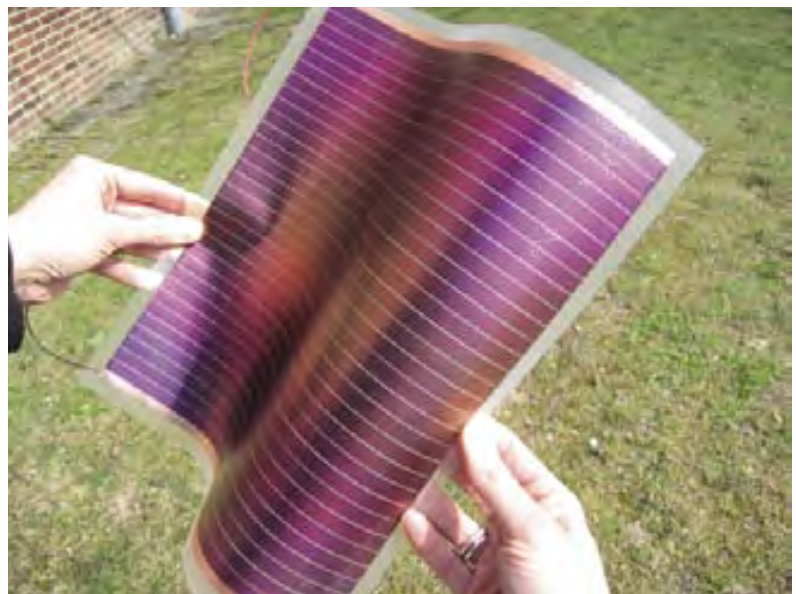
Prøver på PEC solceller

Siden 1990'erne har forskningen haft meget fokus på tyndfilmceller. Målet er at udvikle teknologier og produktionsapparater, der er billige og baseret på en automatiseret masseproduktion med et lille materialeforbrug. Tyndfilmceller er generelt lettere at fremstille og kræver ingen eller lidt silicium og har derfor en større produktionsvariation. Tyndfilmcellerne er smalle bånd, der spænder ud i hele modulets bredde, hvorimellem der er transparente mellemrum. Der er potentialer i at udnytte denne tekniske nødvendighed ved at forøge afstanden mellem cellerne og derved skabe en tydeligere opstribning af panelet som får karakter af persiener. Tyndfilmceller kan fremstilles bøjelige og monteres på bløde materialer som plastfolie, tagpap og på sigt på tekstiler, hvilket giver spændende fremtidsperspektiver.

Endelig forskes der i udviklingen af polymer celler eller plastceller og fotoelektrokemiske solceller også kaldt PEC celler eller 'Grätzel' celler. De danske forsknings- og udviklingsaktiviteter foregår primært på hhv. Risø med grundforskning i polymer celler og på Teknologisk Institut, der arbejder med PEC teknologien. PECceller er mere tolerante over for skygger og øger sin effektivitet ved større temperaturer i modsætning til de traditionelle siliciumbaserede celler, der yder mest, når de er kølede. PEC cellen består af titandioxid og et farvestof, der er forseglet imellem to lag glas. I dag benyttes et rødt farvestof, og enkelte celler er udviklet i grågrønne nuancer. Teoretisk kan cellen udvikles i mange farver og grader af translucens, hvilket i et fremtidsperspektiv vil give et antal af muligheder for at regulere lys og varme i glaseruderne.

De fleste nyere teknologier har en lavere ydelse end de traditionelle siliciumceller. Et billigere produktionsapparat og cellernes flerfunktionelle kvaliteter forventes at kunne opveje dette. Hovedparten af disse cellyper består af organisk materiale, som har en relativ kort levetid. Derfor er der meget fokus på levetidsforlængelse i udviklingen af disse teknologier.

T-shirt med påsyet solcelle, hvorfra det er muligt at oplade sin mobiltelefon. Solcellen er en amorf Si-celle, tyndfilmcelle, der er indkapslet i plast.



'Det ydre i det indre' Mock up der illustrerer hvordan spejle på indersiden af solcellerne giver nye visuelle muligheder for at afskærme for lys i de store glasfacader. I dagtimerne virker facaden åben mens spejlene reflekterer lyset i rummet om aftenen og derved 'lukker' rummet.



Udviklingen af nye solcelleteknologier har traditionelt haft fokus på de tekniske værdier. Først inden for de seneste år har der også været fokus på at definere de arkitektoniske potentialer og integrere disse i de tekniske udviklingsprogrammer. Arkitektskolen Aarhus og Teknologisk Institut har gennem en årrække samarbejdet om at udvikle strategier for definering af arkitektoniske potentialer i fremtidens bygningsintegrerede solcelleteknologier, bl.a. gennem projekterne 'SOLcelle og -lys, et arkitektonisk potentiale' og 'Transparente solceller – fremtidens energi-producerende solafskærmning'.

Med afsæt i, at fremtidens bygningsintegrerede solceller kan fremkalde helt nye arkitektoniske potentialer i form af filtrering af lys og varme samt æstetiske kvaliteter i lystransmissionen, er der i ovennævnte regi afholdt en række kurser på Arkitektskolen Aarhus og Kunstakademiets Arkitektskole, hvor de studerende er blevet stillet opgaven at implementere fremtidens solceller i store, sydvendte glasfacader i kontorbyggerier.

Projekterne arbejder med at proportionere og raffinere solcellerne i glasfacaden. I projektet 'Det ydre i det indre', studeredes, hvorledes indvendige spejle bag solcellerne og perforerede skærme foran kan filtrere og reflektere lys og farver ind i rummet, så facaden bliver en slags tredimensionel lys- og farvereflektor.

I opgavebesvarelsen 'Tegn' arbejdes der med sammenstillingen af to solcelleteknologier. Facaden består af tre lag af hhv. to bevægelige skærme med translucente tyndfilmceller, hvori der er skåret store transparente bogstaver, og en skærm med orange PEC celler. De to bevægelige skærme kan skabe forskellige lyseffekter afhængigt af deres indbyrdes placering og derved regulere kvantiteten og kvaliteten af dagslysindtaget.

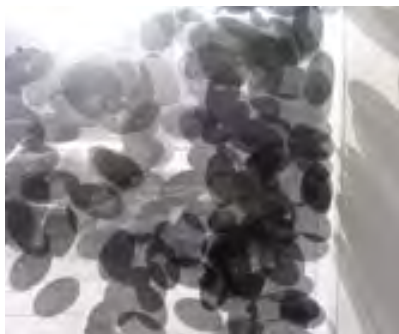
'Tegn' Den orange solcelleskærm giver farve til rummet, mens de translucente tyndfilm skærme regulerer lysindtaget og det direkte udsyn gennem de store bogstaver.



Øverst Teamwork: Udsnit af mock up, hvor fremtidens solceller udgør røde motiver, der kan skydes i forhold til hinanden. De elektriske ledere formes som sølvfigurer i motivet.

Nederst Touchpad: Fremtidens solceller kan måske bevæge sig ved menneskelig berøring. Modelforsøg, hvor lyset i de transparente mobile solceller undersøges.

Modsatte side: Modelstudier i hvordan traditionelle silicium celler kan integreres i glasvæg i badeværelset og derved skabe et stort glasareal og samtidig afskærme for indblik.

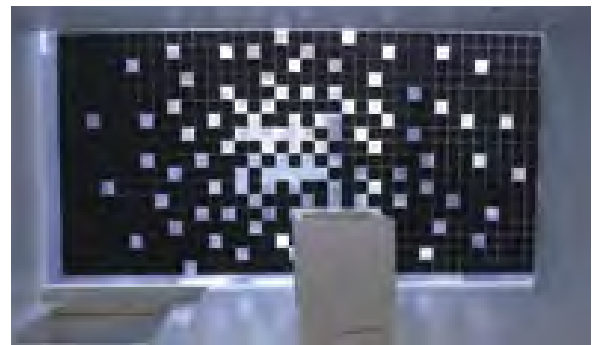


Projektet 'Teamwork' tager afsæt i facaden der samarbejder omkring tekniske såvel som funktionelle og æstetiske værdier. Fremtidens solceller udformes derfor som farvede motiver, der i positive og negative udgaver kan skydes ind foran hinanden og derved afskærme for det direkte lys ved arbejdspladsen men tillade indirekte lys i rummet.

Også projektet 'Touchpad' er et eksempel på en fremtidsvision, der forsøger at bygge bro mellem teknologi og menneske ved at integrere mobile transparente solceller i en rude, der kan reagere på menneskelig berøring. Solcellerne flyttes 'manuelt' rundt efter individuelle ønsker om justering af dagslysindfaldet i kontoret. Efter arbejdstid kan de mobile solceller styres centralt og som pixels i facaden kommunikere virksomhedens budskab udadtil. Solceller i ruderne er et tema, der indeholder mange potentialer. I disse år foregår en rivende udvikling indenfor glasteknologien, f.eks. ved udvikling af ruder med forskellige visuelle effekter, og intelligente ruder der i højere grad kan regulere klima og lysindfald. Disse glasteknologier kan i et fremtidsperspektiv integreres med solcelleteknologi og udgøre fremtidens teknologiske glasfacader, som er langt mere nuancerede og funktionsbetingede end i de glashuse vi bygger i dag.

Som et delprojekt under EFP projektet 'Solcellehus - Typehus med integreret solcelleanlæg' fik en gruppe studerende ved Arkitektskolen Aarhus opgaven at udvikle vinduer med integrerede traditionelle siliciumceller, der filtrerer dagslyset og skaber nye dagslyskvaliteter i boligen. Ideen er at solcelleintegrerede ruder på sigt skal udgøre et standard produkt fra vinduesleverandøren.

En af besvarelserne tager afsæt i, at solcellerne kan integreres i ruderne i badeværelset. Herved bliver det muligt at operere med store glasarealer i badeværelset, idet solcellerne afskærmer for indblik. Solcellerne er monteret i ruden i vertikale baner. Banerne fortsættes i enderne, hvor der er størst behov for afskærmning mod indblik.





Solpanel. 1. præmieprojekt i Sol 1000 studenterkonkurrencen. Panelet fremtræder som en rammeløs translucent glasskive, der er monteret med en afstand til bygningen, hvilket udtrykker en lethed og samtidig tillader ventilation bag solcellerne. De applikerede solcellemoduler fremstår lette, enkle og med en høj grad af fleksibilitet indenfor modulstørrelse og antal.

UDVIKLING AF SOLCELLEINTEGREREREDE FACADER

I solcelleintegrerede facader er der ekstra fokus på det arkitektoniske udtryk, idet solcellerne her bliver en meget synlig del af bygningen. Der er mange muligheder i at udvikle de solcelleintegrerede facademoduler gennem design af komponenten.

Et eksempel på en raffinering af fremtidens applikerede solcellekomponent er det ikke realiserede 1. præmieprojektet fra SOL1000 studenterkonkurrencen 'Solpanel'. I projektet er der arbejdet med at sammenkoble montagebeslag og vekslerettere til at udgøre én og samme enhed. Derved forenkles panelernes udtryk og anvendelse, idet vekslerettere traditionelt er placeret bag på solcellepanelet.

Bevægelige skodder er også oplagte til placering af solceller. Skodderne giver i forvejen spændende muligheder for at justere lys og skygge i interiøret. Ved at integrere solceller i skodderne kan dette potentiale udnyttes yderligere til at give meget smukke og varierede rumlige virkninger. Art Andersen har som led i EFP projektet "Solceller og Arkitekter", udviklet en solcelleskodde der kan bevæge sig både op og ned og til siden. Skodden er opbygget med vinklede glassolceller.

I EFP projektet 'Solcellehus - Typehus med integreret solcelleanlæg' som bl.a. udføres af Jyske Arkitekter i Horsens, er det også intentionen at udvikle solcelleløsninger i form af skodder. I denne skodde er solcellerne påmonteret som amorfe tyndfilmsolceller. Hensigten er at indarbejde skodderne som en integreret del af enfamiliehuset både arkitektonisk og funktionelt, og således at skodden kan indgå som standard tilvalgs element.

Som et andet spændende eksempel på solceller, der kan anvendes til solafskærmning kan nævnes et prototypeanlæg, der er udviklet på Lunds Universitet, hvor solcellerne er en del af et PV/T solenergielement, der samtidigt producerer varme. I dette tilfælde koncentrerer solens lys fra en reflektor ind på et mindre areal af solceller, som samtidig køles af en væskestrøm.

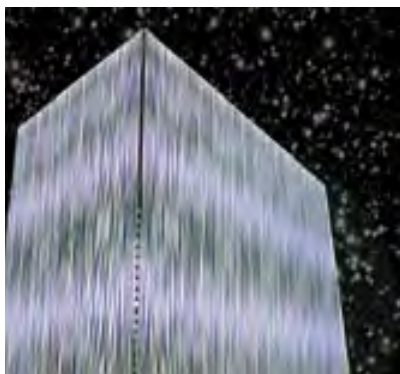
De små figurer: 'SolGælles' opbygning bestående af rude, lodrette solcellebånd, væskebeholder og trælameller.

Stuen set indefra: Modelstudie af lysets filtrering gennem 'SolGælle' komponenten.

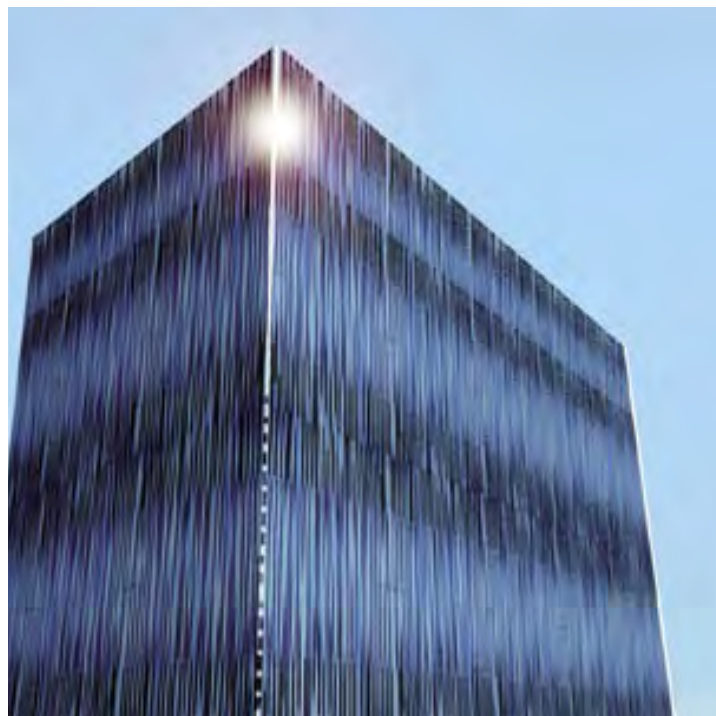


Et andet potentiale for fremtidens solcelleintegrerede facadekomponenter er muligheden for at integrere klimaregulerende eller lystransmitterende funktioner. Et eksempel på fremtidsscenerier på sådanne flerfunktionelle facader er fem designforslag udviklet af ph.d. studerende Artur Slupinski, Arkitektskolen Aarhus og Teknologisk Institut i afgangsprojektet 'SOL-SKIN'.

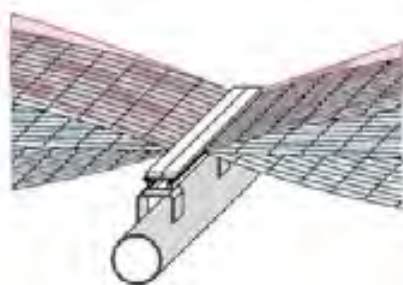
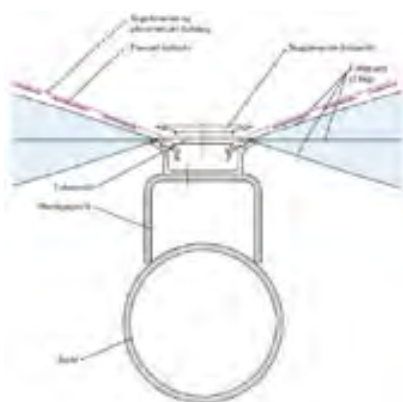
Et af de fem forslag er 'SolGæller', som filtrerer sollyset og fordeler det til forskellige anvendelser som dagslysindtag, elproduktion, væskeopvarmning samt refleksion. Solcellerne er arrangeret i tynde lodrette striber. Bag disse findes væskebeholderne, der optager varmen fra solcellerne og skaber termisk opdrift. Sprækkerne imellem solcellerne transmitterer himmellyset ind i rummet og én gang dagligt vil det direkte sollys transmitteres ind i rummet.



SolarFlexSystem. 1. præmie projekt i Sol 1000 studenterkonkurrencen.



De fem designforslag var første fase til igangværende Ph.d. projekt 'Morgendagens solceller'. Her forsøger Artur Slupinski at udvikle en inspirationsmanual til hvordan solceller kan anvendes til design af facadekomponenter med vægt på de arkitektoniske kvaliteter. Opgavens fokus er at belyse, hvordan supermarkeder som bygningstype kan få styrket deres facadeudtryk, delvis i kraft af solcellernes signalværdi, men også via lysfiltrering.



Detalje af den oppustelige facade, ETFE membranen, hvorpå der skal monteres fleksible plastsolceller.

Hævede boligklynger på forurenet jord. Fællesrummene har oppustelige facader med solceller.

Solceller integreret i nye facadetyper har været i fokus i en prisopgave som tegnestuen Force 4 vandt med projektet BOASE.

I 2000 udskrev SBI i samarbejde med arkitekt- og designskolerne en prisopgave om forslag til fremtidens bolig, byggende på realiserbare visioner om bæredygtighed og tilgængelighed.

BOASE bygger på ideen om at forvandle forurenede arealer i byen til kvalitative byggegrunde for fremtidens boliger. Forurenede grunde i byen renses ved hjælp af træer og gøres beboelige. Planter med kraftigt rodnet kan nedbryde eller binde skadelige stoffer. Ideen er, at man bor i en skov i byen. Hævet op i luften på søjler, hvor man kan røre træernes blade og se over byens tage.

BOASE er en alternativ boform beregnet på mennesker, der lever et liv med skiftende relationer til arbejde, sted og privatliv. Bebyggelsens rumlige princip bygger på dualiteten mellem det uforanderlige og det fleksible. De private boliger, „rammerne“, er en statisk form. De sættes sammen i klynger, og mellem dem dannes fællesrummene. Fællesrummet er bebyggelsens sociale hjerte.

Et af BOASEs fire udviklingsprojekter er udviklingen af den solcelleintegrerede facade i dette fællesrum. Den oppustelige facade består af transparente luftfyldte ETFE-foliepuder.

Foliepuderne fastholdes af aluminiumsprofiler, der er fastgjort til en underliggende stål bærende konstruktion. ETFE membranen er delt op i tre kamre, der kan styres elektronisk og manuelt og derved udgøre en intelligent selvregulerende klimaskærm der er påvirkelig overfor klimatiske og lysmæssige ændringer i omgivelserne. Samtidig fungerer den som energikilde ved hjælp af fleksible plastsolceller af typen Flexcell, der er monteret i den oppustelige membran i et selvstændigt monteret folielag. Solcellerne vil være monteret i mønstre, som vil virke som solafskærmning.

Flexcell cellerne er tynde og bøjelige, har en effektivitet på 3-4% og fremstår violet.



En prototype af boligen udstilles på Ruud Langgårds Vej i Ørestaden fra august 2005. Herefter vil boligen blive beboet og testet i 1 år. Se også www.soltag.net.

Fakta:

Bygherre
SOLTAGNET

Arkitekt
Nielsen & Rubow as Arkitekter MAA

Ingeniør
Cenergia Energy Consultants

Leverandør/installatør
Dansk Solenergi / Ruukki, Racell / ART-Andersen, Velux og Schüco

Etableringsår
2005

Solcelletype
Tag: tyndfilm (UNI-SOLAR) Solafskærmning med polykrystallinske solceller (Art Andersen) Altanbrystning i glas med mono-krystallinske solceller (Schüco) Velux-vinduer med tyndfilm-solceller i glas

Effekt
2.4 kWp fra 4 anlæg



O-Energi Tagbolig

I et spændende udviklingsprojekt om industrielt fremstillede tagboliger, efter de nye lavenergistandarder, har arkitekttegnestuen Nielsen & Rubow i samarbejde med Byfornyelse Danmark, Velux og Cenergia udviklet en hel tagbolig til placering på boligblokke fra 60'erne og 70'erne. Disse blokke er karakteristiske ved deres flade tage, som er en ressource, der kan udnyttes til spændende boliger. Tagboligen, der også har et mindre solvarmeanlæg og ventilation med varmegenvinding, fremstilles industrielt og løftes op på det eksisterende tag uden gener for beboerne. Boligen er udformet som en CO₂ neutral bolig, og ét afz midlerne hertil er integration af solceller hhv. som krystallinske solceller i brystning og i tagvinduet og tyndfilmsolceller i taget. Den anvendte solcelleløsning i taget udmærker sig ved at være en såkaldt PV/T solcelleløsning, der både producerer varme og elektricitet. Dette sker ved, at der i taget er en luftspalte under den ydre metal-/ solcelleoverflade. Og her forvarmes frisk luft, der trækkes ned til en lille varmepumpe, der forsyner lavenergiboligen med varme.

Solcelleintegrerede tage

Integration af solceller i tagmaterialer har interessante perspektiver for arkitekturen, når solcellerne integreres i større enheder frem for i enkeltkomponenter som teglsten eller tagplader. Ved at samle solcellerne i større bygningskomponenter kan tagfladen fremstå som en sammenhængende ensartet flade, hvor solcellerne er en del af materialiteten. Desuden tilgodeses solcellernes behov for samlede elektriske forbindelser.

Der findes allerede komponenter på markedet, hvor solceller er integreret i tagmaterialet.

Den tyske tagbeklædningsproducent Alwitra GmbH Trier har udviklet produktet Evalon-Solar med laminerede tyndfilmceller fra Uni Solar. Tagbeklædningen kan rulles på som tagpap og bruges på alle slags tagflader med stor fleksibilitet. Materialet er i kraft af sin lethed også velegnet til konstruktioner, der kræver lette beklædninger. En lignende løsning er udviklet af tagdugproducenten, Sarnafil, som også anvender UniSolar tyndfilmsolceller integreret i tagdugen. For at undgå for høje temperaturer kræves der her, at der kun anvendes lyse tagdugsmaterialer.

Som led i EFP projektet "Solceller og Arkitektur" er denne løsning blevet installeret på et fælleshus i boligbebyggelsen Solengen i Hillerød.

Der er ingen tvivl om, at vi vil se flere af denne type meget bygningsintegrerede solcelleprodukter fremover.

Der er arkitektoniske perspektiver i de indrammede såvel som rammeløse moduler, der udgør dele af eller hele tagbeklædningen. Modulerne er monteret i skinner og ofte i systemer, hvor de ligger ind over hinanden som traditionelle tagplader, hvilket underdeler en ellers meget glat tagflade fint. Disse løsninger fremstår elegante og relativt enkle.

Der forsøges i at udvikle store solcellemoduler, der kunne skabe en anden skala som tag- og facadebeklædning, ligesom der er fokus på at udvikle solcelleintegrerede tagmoduler, der leveres fra producenten som færdige præfabrikerede bygningsdele med isolering og indvendig beklædning m.v.

Gregory Kiss, solcellefabrik i Heliodomi, Grækenland.

SolarFlexSystem. 1. præmie projekt i Sol 1000 studenterkonkurrencen. 'SolarFlexSystem' er et forslag til et tagkassettesystem monteret mellem spærene. Kassetterne kan indeholde et solcellemodul, en traditionel tagbeklædning eller et ovenlys. Taget kan på en gang skabe lysindtag, komfort og producere energi.

På Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi har man i et samarbejde med 7 danske virksomheder udviklet en ny type tagbeklædning. Formålet med projektet er at udvikle, afprøve og demonstrere en solcelletagplade med tilhørende monteringsliste og tætningssystem, som kunne udgøre selve tagbeklædningen. Tagbeklædningen er monteret på en tidligere Remisebygning i Randers. Huset fungerer i dag som beboerhus. Solcelleanlægget er på 150 m² og består af solceller lamineret på glasplader, som udgør selve tagpladen. Pladerne er samlet med nyudviklede profiler af aluminium, som bliver tilpasset hver enkelt fag. Profilerne leveres i forskellige farver og former.

Der er spændende tendenser til nytænkning af taget som et modulopbygget flerfunktionelt element, der i højere grad end traditionelt spiller sammen med naturens energier ved at udnytte solens lys til at generere såvel elektricitet som varme og dagslysindtag.

Endelig kan man forestille sig at fremtidens tagflader i højere grad får status som et arkitektonisk landskabeligt element, hvori solcellerne er integreret. Dette er den bærende arkitektoniske idé i 'solcellefabrikken' i Heliodomi, Grækenland som er tegnet af arkitekterne Kiss + Cathcart fra New York.



'The 2020 Tower' er der etableret offentlige, funktionelle og sociale etager med skoler haver etc. En bæredygtig by i 150 etager.





The 2020 Tower – et fremtidsscenario

Arkitekterne Kiss + Cathcart har i samarbejde med Arup Engineers udviklet et fremtidsscenario for et højhus, The 2020 Tower. Projektet er udviklet i forbindelse med udstillingen 'Big + Green' januar 2004 på Museum of the City of New York. (kildeliste?) Bygningen er designet og beregnet til praktisk, teknologisk og økonomisk at kunne udføres i 2020. Facaderne er beklædt med solcellepaneler i horisontale bånd. Solcellerne forsyner bygningen med 65% af energiforbruget. Det resterende forbrug dækkes ind fra energi produceret af store vindturbiner på taget. Målet med fremtidssceneriet har været at revurdere program, konstruktion, energiproduktion og -forbrug, vand og sikkerhed i højhuset og tænke elementerne sammen til et fremtidsscenario for selvforsynende højhuse, der udgør et sundere, kvalitativt og mere sikkert sted at være.

[9]

[9] Hansen, E.K., 2002. *Fra Rumteknologi til Bygningskomponent – om udviklingen i solcelleteknologien*. Arkitekten vol. 22, s. 2-6. Arkitektens Forlag, København

FRA RUMTEKNOLOGI TIL BYGNINGSKOMPONENT

OM UDVIKLINGEN I SOLCELLETEKNOLOGIEN

AF ARKITEKT ELLEN KATHRINE HANSEN

Solcelleteknologien er i rivende udvikling. Udbuddet af cellyper, modulstørrelser, former, farver og produkter er stort og usammenhængende. Hvis solceller skal blive konkurrencedygtige overfor andre alternative energikilder må der ske en målrettet tværfaglig produktudvikling med lavere pris, forbedret teknologi og øget arkitektonisk kvalitet til følge.



Arkitekten viste tidligere i år eksempler på solceller integreret i nyere danske og europæiske byggerier.

Med afsæt i resultaterne fra SOL100-projektets studenterkonkurrence, udstikker arkitekt

Ellen Kathrine Hansen her vejen for den fortsatte teknologiske udvikling af solceller. Der ligger i følge forfatteren især en udfordring for arkitekter at indgå i tværfaglige samarbejder, hvor produkterne udvikles med den kompleksitet og flerfunktionalitet der kræves af nye teknologiske byggekomponenter.



På ungdomsboligerne på Silkeborgvej i Århus er solcellerne anvendt som arkitektonisk element integreret i den sydvendte facade.



Renovering af Kollektivhuset på Hans Knudsens Plads i København for De Vanføres Boligselskab

Solceller skal ikke betragtes som applikerede fremmedelementer - ikke engang som en komponent i sig selv. Solcellen er et blot et stof, der ved belysning medfører en elektronvandring. Hovedparten af de solceller der findes på markedet i dag består af tynde skiver af grundstoffet silicium i en enten monokrystallinsk eller polykrystallinsk tilstand. I de seneste år har forskningen koncentreret sig meget om nye tyndfilmceller. Disse celletyper kræver ingen eller lidt silicium, er generelt lettere at fremstille og har derfor en større produktionsvariation. Det er endnu kun silicium tyndfilmcellerne der er i produktion.

Solcellerne skal være elektrisk forbundet og

den producerede strøm skal via en vekselretter tilsluttes elnettet, et batteri eller et direkte forbrug. Processen er usynlig, lydløs, ubevægelig og så godt som uopslidelig. Solcellens energioverførsel drager en smuk parallel til fotosyntesen, hvor sollyset giver liv til plantefaunaen. Der ligger store potentialer i at udtrykke denne sammenhæng mellem naturens mangfoldighed og teknologien, så solcelleteknologien opleves såvel organisk som mekanisk. Samtidig opleves filtreringen af lyset gennem planternes blade som en stor æstetisk kvalitet, parallelt til dagslysintaget gennem den translucente solcellekomponent.

En væsentlig parameter for en prisreduktion og

arkitektonisk integration er, at solceller bruges som et multifunktionelt element i klimaskærmen. Komponenten kan påvirke indeklima gennem passiv opvarmning og dagslysinntag. Solceller skal orienteres mod solen, hvilket kan skabe nye rumlige kompositioner og endelig vil bygningen signalere egenproduktion af energi. Solcellekomponenten kan herved præge såvel indeklima, rumlig komposition, lysindtag og facadeudtryk.

Den internationale udvikling på solcelleområdet

Markedet indenfor solceller er siden 1980'erne vokset med 30% årligt, og samtidig er prisen så godt som halveret hvert 7. år. Multinationale in-



Forslag 25/11319 'Solpanel'
Sara Holm, Martin Overgaard Pedersen, Mette Louise Sørensen, Arkitektskolen i Aarhus, Afd. A

'Solpanel' er et forslag til et produkt, som kan applikeres til eksisterende bygningsfacader og tage med flere steder. Det er et fleksibelt modulsystem, som kan fås i flere standardmål, som kan benyttes enkeltvis eller indgå i konstruktioner alt efter opgavens karakter. Solcellepanelet består af et glaspanel, som indkapsler en mængde solceller. Panelet fastgøres med hjælp af beslag, som skaber en vis afstand til bygningen, og dermed tillader ventilation af solcellerne samt tillader placering af vekselrettere, hvorfra vekselstrømmen kobles direkte til elnettet. Glaspanelet skal fremtræde med en stor grad af translucens, som vil få panelet til at opleves som en let applikation, hvilket understreges af rammens fravær.

vestorer som Shell, BP og Siemens har forberedt produktionsapparater til den dag markedet for alvor eksploderer.

Solceller er en af de få vedvarende energi teknologier som er opretholdt som prioriteringsområde i EU's 6. rammeprogram. EU støtter udbredelsen af solcelleteknologi gennem støtteprogrammer til forskning, udvikling og demonstration. Målet er at 1% af strømforbruget produceres fra solceller i år 2010. Der er i disse år ambitiøse solcellefremmeprogrammer i Japan, USA, Australien, Tyskland, England, Holland, Schweiz, Italien, Frankrig, Spanien m. fl.

Den danske udvikling på solcelleområdet

I Danmark er der i Energi 21 formuleret et delmål frem til år 2030, hvor vedvarende energi forventes at dække ca. 1/3 af Danmarks energiforbrug. Såfremt prisen for solceller i denne periode bliver attraktiv, kan solceller være med til at opfylde det

mål. Energistyrelsens solcelleaktiviteter har været støttet gennem udviklings- og demonstrationsprojekter under Udviklingsprogrammet for Vedvarende Energi (UVE) og programmer for solceller under særprogrammer til de nye energiteknologier. Alle ordninger faldt væk med den nye finanslov, men regeringen besluttede senere at gennemføre demonstrationsprojektet SOL1000 i reduceret omfang. Endelig er energiforskningsprogrammet (EFP), der henvender sig til større forskningsprojekter, reduceret til omkring 1/3.

Udviklings- og demonstrationprojekter

UVE midlerne har i de seneste år støttet en del byggerier med bygningsintegration af solceller. På Silkeborgvej i Århus er solcellerne anvendt som et arkitektonisk element integreret i den sydvendte facade. Solcellepanelerne er monteret i nyudviklede alurammer med mulighed for at trække forvarmet friskluft ind til de bagvedliggende ung-

domsboliger. Projektet er udviklet i et projektkonsortium med Arkitektgruppen Aarhus, Niras, Vel-fac og oi-electric. Bygherre er Højbo og Bø83.

I forbindelse med renoveringen af Kollektivhuset på Hans Knudsens Plads for De Vanføres Boligselskab ved Boligkontoret Danmark er solceller integreret i bygningens altanbrystninger. De skydbare farvede glas fungerer som spjæld, således at solcellernes overskudsvarme enten kan anvendes på altanen eller ventileres ud i det fri gennem spalter i profilerne. Facadens foranderlighed afspejler solcellens teknik og altanernes brug. Projektet er udviklet af DOMUS arkitekter a/s i samarbejde med Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S.

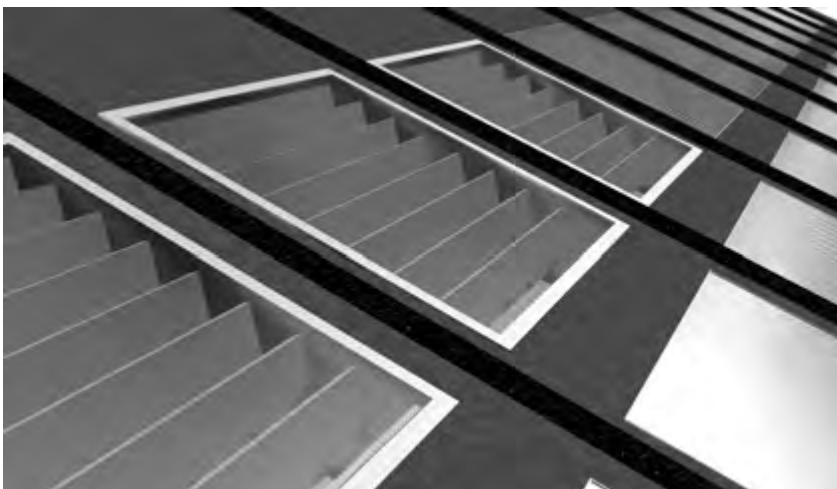
SOL1000

SOL 1000 projektet begyndte i 2001 og løber over fire år. Målet er at installere op mod 1000 anlæg på fortrinsvis private huse. SOL 1000 er landsdækkende med samlede omkostninger på 25 mio. kr.,



Forslag 16/03067 'SolarFlexSystem'
Lars Lundsgaard, Rune Lundsted Jensen Institut for
Arkitektur og Design, Aalborg Universitet

'SolarFlexSystem' er et forslag til en serieproduktion. Solcellemodulet, tagmodulet og ovenlysmodulet skal designes, så de kan indgå som en naturlig integreret del af bygningens tag. De skal tænkes 'som en del af en klimaskærm som på samme tid skaber lys og komfort i vore boliger'. Ideen er at skabe et fleksibelt modulbaseret tag, som monteres i forbindelse med renovering eller nybygning. Tanken er, at det skal være muligt at udskifte enkelte moduler i taget og indsætte nogle nye med andre eller tilsvarende funktioner. Det samlede tag skal fremtræde som en helhed med æstetiske og funktionelle kvaliteter både i det ydre og boligens indre. Modulerne placeres mellem spærrene.



hvoraf 8 mio. kr. ydes i form af egenfinansiering. Læs mere om projektet på www.sol1000.dk

I SOL1000 projektet har bygningsintegration af solceller en central prioritering idet en betydelig del af anlæggene skal være pilotprojekter for udviklingen af montagesystemer, solcellekomponenter og integrerede løsninger. Som inspirationsgrundlag til pilotprojekterne og for at udbrede kendskab og interesse for solceller er SOL1000 projektet indledt med en idekonkurrence for arkitektstuderende. Studerende ved Kunstakademiets Arkitektskole i København, Arkitektskolen i Aarhus og Institut for Arkitektur & Design på Aalborg Universitet har i foråret givet deres bud på hvordan solceller kan integreres i vores bygninger.

Der er arbejdet med tre problemstillinger inden for arkitektonisk integration af solceller, nemlig udvikling af nye montagesystemer til applikation af anlæg, forslag til bygningskomponenter, hvor solceller indgår i en flerfunktionalitet, og endelig for-

slag til bygningsintegration, hvor solcellerne indgår i den overordnede disponering af bygningen.

De 47 konkurrenceforslag giver et billede af hvad der er af muligheder i bygningsintegration af solceller. Forslagene spænder fra nye montagesystemer med eksisterende solcellekomponenter til forslag der visionært bygger på fremtidens solceller. Nogle forslag tager afsæt i en ny brug af materialer, andre lægger vægt på solceller som et elektrisk element, og der er forslag, der tager afsæt i en signalværdi i det energiproducerende element. Herudover belyser enkelte projekter problemstillingen i den store skala og giver forslag i relation til planlægning.

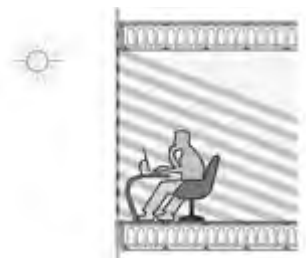
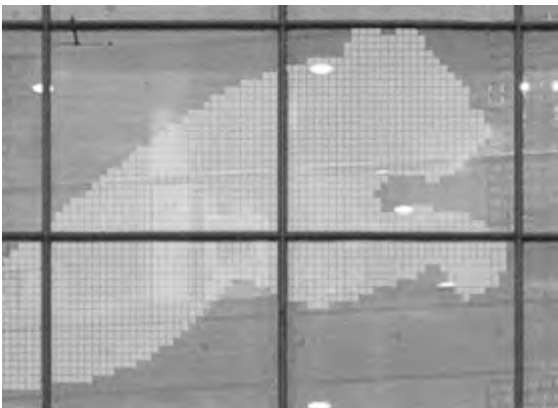
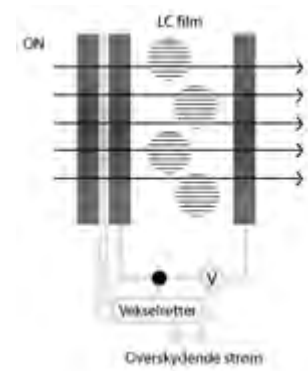
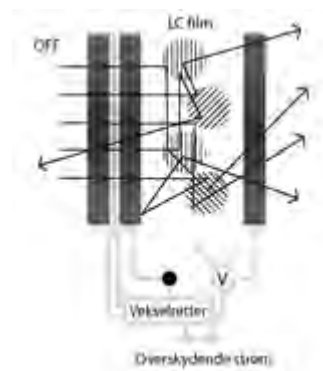
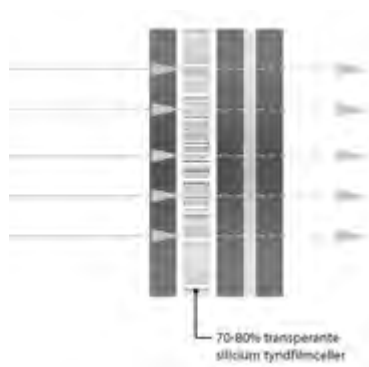
De tre 1. præmieforslag hedder henholdsvis: 'Solpanel' som raffinerer det applikerede solcellepanel, 'SolarFlexSystem' som er et tagkassettesystem, hvor kassetterne kan indeholde solceller og ovenlys og endelig 'Shodi-Cell' projektet, der integrerer semitransluente tyndfilmceller i en elek-

trokrom glasfacade. Det er intentionen at forslagene vil blive brugt som fælles reference og inspiration i diskussioner, udstillinger, opsætninger og produktudviklinger i SOL1000's projektløb.

Forskning indenfor solcelleteknologi

Ud over demonstrationsprojekter som ovsentående er der et behov for at inddrage arkitektfaglig kompetence tidligt i udviklingsprocessen i grundforskningen indenfor solcelleteknologi.

På Solenergi Centeret ved Dansk Teknologisk Institut arbejder en gruppe forskere med at udvikle en fotoelektrokemisk solcelle. Den såkaldte PEC-celle er en helt speciel type tyndfilmcelle. PEC-cellen består af et halvledermateriale i form af titandioxid - som er det hvide pigment i tandpasta! - samt et farvestof. Disse konstrueres i et sandwichelement mellem to lag glas, f.eks en vakuumrude. Farvestoffet kan antage et utal af farver ligesom titandioxiden kan varieres.



Forslag 35/61038 'Shodi-Cell'

Peter Wittrock Nielsen, Jesper Bork, Institut for Arkitektur og Design, Aalborg Universitet

'Shodi-Cell' er et forslag, der søger at integrere den energiproducerende facade med en interaktiv klimaregulerende skærm, der kan virke som kommunikationsled med omverdenen. Dette foreslås realiseret med en ca. 20 mm tyk klimaskærm, som indeholder semitransparente solceller og regulerbare elektrokrome glasceller, der giver brugeren mulighed for selv at definere sin solafskærmning (placering, omfang og farve). Desuden vil denne kunne fungere som et elektronisk megadisply, der kommunikerer livet bag facaden samt virksomhedens samlede budskab.

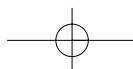
Forslaget er ualmindeligt smukt og præcist beskrevet. Der er hentet inspiration i japansk bygningskultur og naturens 'konstruktioner' mundende ud i, at opgaven i dag er at skabe en symbiose mellem teknologien og naturens principper.

PEC-cellen udgør derfor i sig selv en komponent, der indeholder muligheder for at integrere klimaregulerende såvel som æstetiske værdier. Ved at lade solens stråler trænge imellem og gennem PEC-cellen opstår et lysindtag med både direkte og diffust lys. Indtag af solens lys og varme kan reguleres gennem en spektral selektivitet, der styrer hvilke områder af lysspekteret solcellekomponenten absorberer, hvilke der reflekteres og hvilke der transmitteres og giver lys og varme inde i bygningen.

Energistyrelsen bevilgede i 2001 midler til formulering af en værdisætning af de arkitektoniske parametre, for derved at integrere disse i udviklingen af et energiproducerende bygningskomponent som PEC-cellen. Projektet er realiseret som et forprojekt, der beskriver solcellens udvikling, typer og teknik, sollysets betydning og potentialer i arkitekturen samt arkitektoniske potentialer i fremtidens brug af solceller.

Publikationen "SOLcelle & -lys, et arkitektonisk potentiale – idègrundlag for hvordan solceller og sollys kan spille sammen" kan ses på hjemmesiden www.solarcell.dk/aaa.asp

Arbejdet med solcelleteknologi er en særlig udfordring idet problemstillingerne er relativt nye og udviklingen hastig og uforudsigelig. Der er i de seneste år udviklet et netværk af solcelle entusiaster lige fra solcelleproducenter og -leverandører til byggevarerproducenter, forskere, elforsyningsselskaber, ingeniører og arkitekter. Netværket er opstået gennem de konkrete opgaver med udbredelsen af solceller samt gennem Solcellegruppen under Energistyrelsen og Dansk Solcellegruppe under Danvak. Der ligger et stort potentiale i at erfarer og samarbejder som disse plejes og udvikles, så Danmark fortsat kan være med i den internationale satsning på solcellerområdet. Der er kun tilbage at håbe at det igen får regeringens bevågenhed.



[10]

[10] Hansen, E.K., *SOLcelle og SOLlys – et arkitektonisk potentiale. Idégrundlag for hvordan solceller og sollys kan spille sammen*, 2001. Arkitektskolen Aarhus.

SOLcelle & SOLlys et arkitektonisk potentiale

Idégrundlag for hvordan solceller og sollys kan spille sammen



Slutrapport, 1. juni 2001

Projektet er udarbejdet i perioden januar 2001 til maj 2001 på Arkitektskolen i Aarhus af:

Ellen Kathrine Hansen, arkitekt maa

Det er udført i samarbejde med Teknologisk Institut med projektet "Udvikling af bygningsintegreret PEC-solcelle" under projektgruppen:

Eik Bezzel, Civilingeniør, materialekemi
Hanne Lauritzen, Civilingeniør, materialekemi
Signe Wedel, Akademiingeniør, kemi

Projektet er finansieret gennem Energistyrelsens UVE-midler og Arkitektskolen i Aarhus.

Denne publikation findes også på hjemmesiden www.solarcell.dk, hvor den kan downloades som en PDF-fil.

Publikationen findes også i engelsk udgave på samme hjemmeside

Indhold

1. SOLcelle og SOLlys, et arkitektonisk potentiale

- 1.1 Projektbeskrivelse
- 1.2 Baggrund

2. SOLcellen, udvikling, typer og teknik

- 2.1 Solcellens historie
- 2.2 Solcelletyper
- 2.3 Silicium
- 2.4 Mono- og polykrystallinske solceller
- 2.5 Amorfe solceller
- 2.6 Alternative solceller
- 2.7 PEC cellen
- 2.8 Spektral selektivitet – transmission, refleksion, absorption
- 2.9 PEC cellen og den spektrale selektivitet
- 2.10 Solcellers anvendelse
- 2.11 Litteratur

3. SOLlyset, betydning og potentialer i arkitekturen

- 3.1 Dagslyset i arkitekturen
- 3.2 Glasset i arkitekturen
- 3.3 Klimaskærmen
- 3.4 Nye teknologiske glaskomponenter
- 3.5 Litteratur

4. Arkitektoniske potentialer i fremtidens solceller

- 4.1 Teknologien møder kulturen
- 4.2 Teknologien møder naturen
- 4.3 Transparens – form, rum og lys
- 4.5 Projektbeskrivelse 'Transparens lys, energi og arkitektur'
- 4.6 Miljørigtig komponentudvikling af PEC-cellen
- 4.7 Litteratur

1.1 Projektbeskrivelse

SOLcelle og SOLlys, et arkitektonisk potentiale.

Forprojekt

Idégrundlag for hvordan solceller og -lys kan spille sammen

Solceller er en forureningsfri energikilde der vinder større og større udbredelse i byggeriet. Derfor er der et behov for, at solcellekomponenter udvikles, så de kan komme til udtryk i arkitekturen ved at udnytte solcellers orientering mod solen til et arkitektonisk potentiale.

Når solens stråler trænger gennem translucente solceller, opstår et dagslysindtag, der tegner solens bevægelse og foranderlighed. Samtidig bliver solcellekomponenten et aktivt element, der leverer dagslys, passiv solvarme, kontakt til omgivelserne og elektricitet.

For at opnå en synergi mellem disse potentialer kræves en integrering af arkitektoniske ønsker og behov, på lige fod med tekniske og økonomiske krav, tidligt i solcellernes udviklingsprogram. En forudsætning er, at værdierne kan vejes op mod hinanden. Hensigten med dette projekt er derfor at etablere en fælles vidensbase omkring *solceller* og *sollys* i arkitekturen.

Projektet formidles gennem forelæsninger og nærværende (digitale) publikation. Målgruppen er primært arkitekter og forskningsmiljøer indenfor solcelleteknologien.

Desuden danner projektet grundlag for en videreudvikling af en arkitektfaglig arbejdsmetode som et redskab til en konstruktiv kommunikation og et udvidet samarbejde mellem udviklingsmiljøer, som arbejder med arkitektur og med solcelleteknologi. Herunder Teknologisk Institut og Arkitektskolen i Aarhus specielt omkring udviklingen af den elektrokemiske solcelle PEC-cellen.

1.2 Baggrund

Idéen til projektet er et resultat af Ellen Kathrine Hansens arbejde som arkitekt på flere opgaver med integration af solceller i byggeriet, herunder Ikast Seminarium, SOL-300, SOLEN i Skolen og SOL Erhverv. Opgaverne demonstrerer med tydelighed at dagens solceller med deres standardiseret udformning har svært ved at tilføre bygningen andre kvaliteter end det at producere elektrisk strøm. Solcellerne er udviklet til en udvendig applikation på bygningens tag eller facade, mens de indvendige rumlige forhold er forbigået. Anskues solcellen derimod som en komponent i fremtidens byggeri, bør den ud over at producere strøm, indeholde arkitektoniske værdier, der bygger på tidens teknologiske og kulturelle visioner.

Projektet samler sig om en bestemt case, nemlig den elektrokemiske solcelle, PEC cellen. Inddragelse af en arkitekt i udviklingen af solceller er også et resultat af Teknologisk Instituts arbejde med udviklingen af PEC cellen. Arbejdet er initieret blandt andet, fordi cellen har kvaliteter, som gør den attraktiv for integration i byggeriet. For at udnytte disse potentialer optimalt, er det nødvendigt at inddrage design- og arkitektfaglig kompetence tidligt i udviklingsprocessen udover den ingeniørfaglige ekspertise, som p.t. er koblet til udviklingen af PEC cellen.



Ikast Seminarium, facade mod nord, undervisningslokaler. (2)



Ikast Seminarium, facade mod syd og vest, uopvarmet atrium. (3)



Atrium (4)



Atrium, hvor sydvendte blændparti i shedtag er erstattet med termorude med integrerede silicium solceller. (5)



Kig op i shedtag, hvor der er blændet for det direkte lys fra syd og der derfor kun er dagslysindtag fra nord. (6)

Kig op i shedtag, hvor det direkte sollys filtreres mellem silicium solcellerne. Det direkte lys opleves varmt og spillet mellem lys og mørke skaber et levende lysspil. (7)





Tagintegration af solcelleanlæg, SOL 300.
(8)



Solcelleanlæg på Brædstrup Skole i forbindelse med projektet 'Solen I Skolen', hvor solcelleanlæg knyttes til fysikundervisningen. (9)



Solcelleanlæg, 4kWh, på sydendt jordskråning ved OK benzin i Korsør, i forbindelse med projektet SOL Erhverv. (10)

(1-7) Ikast Seminarium af arkitekterne Frost og Møller I/S samt arkitektfirmaet Hune & Elkjær.

Fotos: Ellen Kathrine Hanen

(8-10) Projekter under Elforsyningselskabet EnCon, Arkitekt Ellen Kathrine Hansen, finansieret gennem Energistyrelsen.

Fotos: Ellen Kathrine Hansen

2. SOLcellen, udvikling, typer og teknik

2.1 Solcellens historie

Der har altid været en fascination i at kunne høste solens energi. I nyere tid har der været mange forsøg med at overføre energien fra solen til en alternativ energiform. Det fysiske fænomen der omdanner solens lys til elektricitet kaldes den 'fotovaltske' effekt blev opdaget af den franske fysiker Edmund Becquerel i 1839. Han påviste, at der opstår en elektrisk spænding, når to identiske elektroder i en svag ledende opløsning bliver udsat for lys. Dette førte til opfyldelse af drømmen om, at solens enorme energimængder nu gennem sofistikeret teknologi og simpel teknik kunne indfries. Målet var gratis elektricitet fra solen.

I 1880'erne udvikledes en solcelle af selen, den havde en effektivitet på ½%. Forskningen fortsatte og i 1920'erne og 30'erne fandt man det teoretiske grundlag for den nuværende solcelle. Et andet vigtigt skridt for solcelleteknologien skete i 1940'erne og 50'erne, da man producerede solceller på højtrent krystallinsk silicium. Sidstnævnte metode går under benævnelserne Czochralski-metoden. I 1954 resulterede forskningen på Bell Laboratories i USA i en siliciumcelle, som er den solcelletype vi kender i dag. Den havde en effektivitet på 4%.

Det egentlige skub i udviklingen af solceller skete i forbindelse med udviklingen indenfor rumindustrien i midten af 1950'erne. Her søgte man en vedvarende energikilde til satellitter og rumstationer. Solceller var energikilden, der var pålidelig, let, uden bevægelig dele og kunne fungere i et lukket system, hvor der kunne produceres energi i mange år uden nogen form for vedligeholdelse. De første solcellemoduler blev derfor udviklet til rumindustrien, de var dyre at producere og havde en lav effekt. Den tekniske udvikling af solceller har siden været en del af rumprogrammerne. Udviklingsomkostningerne har været enorme, men solcellerne er et nøgleprodukt for rumindustrien.

Under energikrisen i 1970'erne kom der for alvor fokus på anvendelsen af solceller i byggeriet, hvilket fik udviklingen af solceller til byggeindustrien til at ekspandere op gennem 1980'erne. Opmærksomheden på den begrænsede mængde af de fossile brændstoffer satte fokus på en bedre balance mellem bygningens klima og ressourceforbrug. Den tidlige modernismes bygningers fuldstændige mekaniske klimakontrol blev betragtet som komplekse huse bag curtainwall'ens enkelthed. Forskningen indenfor solcelleindustrien gik i retning af at udvikle velfungerende solcellelementer med en høj effektivitet og et rimeligt prisniveau.

Samtidig satte glasindustrien gang i udviklingen af nye avancerede energiglastyper. Byggeteknikken blev langt mere kompleks som følge af de nye krav til en integrering af de bæredygtige aspekter.

Udviklingen af nye materialer og byggekomponenter har åbnet for et utal af muligheder for integration eller applikation af solceller. I dag arbejdes der på at solcellekomponenter når det stadium, hvor forholdet mellem pris og ydelse bliver så gunstigt at det får markedet til at ekspandere.

I de senere år har forskningen koncentreret sig meget om de forskellige tyndfilmceller, der har fået benævnelsen 'fremtidens solceller'. Disse celletyper er generelt lettere at fremstille, kræver ingen eller meget lidt silicium og er fleksible for variationer til bygningsintegration. Det er endnu kun silicium-tyndfilmcellen der er i produktion.

2.2 Solcelletyper

Hovedparten af de solceller der findes på markedet i dag består af grundstoffet silicium (C-si) i en enten monokrystallinsk, polykrystallinsk eller amorf (ikke-krystallinsk) tilstand. Solceller af andre materialer som f.eks. PEC cellen er endnu ikke markedsført i større omfang.

	Monokrystallinsk	Polykrystallinsk	Amorfe/tyndfilm
Effektivitet i %			
Laboratoriecelle	Ca. 24	Ca. 20	Ca. 16
Typisk siliciummoduler	12-15	10-13	4-9
Form	Runde el. kvadratiske	Kvadratiske	Smalle striber
Farve	Sort/mørkegrå/blålig	Blålig, changerende	Sort/mørkebrun
Årligt udbytte ca.	120 kWh/m ²	100 kWh/m ²	50 kWh/m ²
Fald i modulydelse ved 1 grad temp.stigning	Ca. 0,5%	Ca. 0,5%	Ca. 0,2%
Relativ pris/m²	Høj	Mellem/høj	Lav

Figur 1 Oversigt over silicium solceller

Kilde til Figur 1.
BPS Solceller i byggeriet, Publikation 128, januar 2000

2.3 Silicium

Silicium, som indeholdes i mineraler og sten og udgør $\frac{1}{4}$ af jordens overflade, er det andet mest hyppige grundstof. Der kendes ikke en proces, der effektivt og rentabelt kan rense silicium. Derfor får solcelleindustrien hovedparten af deres silicium som affaldsprodukt fra elektronikindustrien, hovedsageligt fra transistorradioer og mikrochips, hvilket er en uheldig binding for markedet. Silicium udgør i dag halvdelen af prisen for mono- og polykrystallinske solceller.

Bearbejdningen af silicium er baseret på rentrumsfaciliteter, et dyrt produktionsapparat som kendes fra halvlederindustrien. Produktionen placeres typisk der, hvor i forvejen er elektronisk industri, primært i Tyskland, England, Spanien, USA og Japan, hvorfor en centralisering omkring disse områder finder sted.

Produktionen er afhængig af kapitalstærke vidensbaserede virksomheder. Multinationale firmaer som Shell, BP og Siemens Solar investerer milliarder i forberedelsen af produktionsapparater til den dag, hvor markedet for alvor slår igennem. Disse produktionsapparater er udviklet til standardmoduler, der bærer præg af at der satses på de kendte produkter, der har en chance for at erobre markedet. De produkter der er på markedet i dag er højt udviklede på et teknisk og ydelsesmæssigt niveau, mens de arkitektoniske, æstetiske som funktionelle, aspekter er forbigået.



Poly- og monokrystallinsk silicium solcelle
Silicium affaldsstykker fra computerindustrien, støbt blok og poly- og mono krystallinsk skive.
Amorfe silicium celler, translucent gennem cellen og i opdelingerne. (11)



Solceller brugt i rummet.
Silicium industrien. (12)

(11) *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 218 ill. 1-5.
Ill. 3 *Solarex*, Frederick MY
(12) *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 219 ill. 6-10.
Ill. 6-7 NASA

2.4 Mono- og polykrystallinske solceller

De monokrystallinske celler er udviklet gennem ét krystal, der fremstilles ved at silicium i smeltet tilstand (1410 grader) trækkes op fra en cylinder som ét krystal. Dette krystal skæres i tynde skiver på ca. 0,3 mm, der benævnes Wafer silicium. Herefter gennemgår skiverne en række kemiske og fysiske processer som bevirker, at to typer stof inplanteres i cellen, således at der ved lyspåvirkning flyttes elektroner igennem cellen. Cellen påføres et metalgitter som kontaktnet på oversiden og en massiv leder på bagsiden.

Lysindtrængningsdybden i silicium er 10 my, derfor udnyttes krystallen kun i overfladen, hvorfor en stor del af den kostbare siliciumskive kun er til stabilitet af skiven. Herudover går der en del silicium til ved opskæringen af skiverne. Denne type solcelle har været produceret i over 30 år, udviklingen er nået dertil, hvor et prisfald primært kan ske gennem en øget produktion.

De polykrystallinske celler er skåret ud af en kvadratisk blok af støbt silicium. Denne type celle er gennemprøvet og har også været på markedet i mange år. Virkningsgraden er lidt lavere end cellerne af monokrystallinsk silicium, men den kvadratiske form tillader en tættere pakning af cellerne i modulet, hvilket til dels kompenserer for dette.

De mono- og polykrystallinske celler monteres med en bagplade, som ofte er lys for at holde temperaturen nede, og en forplade i hærdet glas eller plast. Der er omkring 40 celler pr. modul. Samlingerne forsegles med fugemasse eller en ramme, typisk aluminium. Der kan i disse komponenter indarbejdes dobbeltfunktioner som solafsærmning for den direkte sol og lysspil ved at lade lys trænge imellem cellerne.

Silicium solcellen har en positiv ladet side og en negativ ladet side, et selvdannet elektrisk felt, der gør, at når lys partikler (protoner) rammer solcellen og slår en elektron løs fra den negative side, vil den søge mod den positive side. Denne gennemstrømning af elektroner er elektrisk strøm. Silicium danner parvis positivt og negativt ladede partikler, og der opstår en elektrisk spænding mellem solcellens for- og bagside, når disse forbindes opstår en elektrisk strøm. Siliciumcellen består af et kontaktag øverst og nederst, et n-type lag der er doteret med fosfor, og derfor har 5 elektroner for at give det en negativ ladning (der er elektroner i overskud), et p-type lag der er doteret med bor, og derfor har 3 elektroner for at give en positiv ladning (det mangler elektroner, der opstår ledige pladser).

2.5 Amorfe solceller

I tyndfilmceller, baseret på amorft silicium, er det kun det aktive lag der er silicium. De produceres i kamre, hvor siliciumatomerne findes i gasarter. Når gaspartiklerne rammer en glasplade fastgøres de enkeltvis i en helt ren tilstand. Der er ofte flere kamre i denne proces. Herefter opdeles fladen i cellestrimler mekanisk eller v.h.a. laser. Siliciumlaget er meget tyndt, 10 my, og kan produceres med en translusens på 30-80%. Herudover giver cellestrimlernes mellemrum en raster karakter, da strukturen er så lille, at den opleves som translucent. Der er altså tale om to former for translusens i modulerne.

I de amorfe tyndfilmceller forvandles lyset til elektricitet gennem en positiv-negativ overgang, der ikke kræver krystalstruktur som i de mono og polykrystallinske celler. I stedet for det positive og negative lag opdeles fladen i strimler der adskiller en positiv del fra en negativ del. Et net af metal leder den elektriske strøm. Udover silicium kan også gallium-arsenid og kobber-indium-diselenid bruges til forbindelses-halvledere.

De amorfe celler indkapsles i glas eller plastik, hvilket gør dem fleksible. Forbruget af silicium og kravet til renhed er beskedent og virkningsgraden betydelig lavere end de traditionelle siliciumceller.

Det er først i de senere år at silicium-tyndfilmceller produceres i større mængder.

2.6 Alternative solceller

I de senere år har forskningen i solceller koncentreret sig meget omkring forskellige tyndfilmceller fremstillet af billigere materialer end silicium. De væsentligste er solceller af Cadmium-Tellurid og Cupper-Indium-Gallium-diSelenide samt den elektrokemiske PEC celle af titan-dioxid.

Cadminium-Tellurid cellen har været meget brugt i lommeregner og mindre maskiner. Det har været vanskeligt at producere den i større enheder, da dette kræver en meget ensartet struktur. Der er opnået en virkningsgrad på 15% på små celler, mens større moduler kun ligger på 6-8%. Cadmium er giftigt, hvilket også har haft betydning for, at man så godt som er gået væk fra det i større moduler.

Derimod er solceller af Cupper-Indium-diSelenide (CIS) eller af Cupper-Indium-Gallium-diSelenide (CIGS) en lovende solcelletype. Siemens Solar fremstiller små moduler på 10-20 W og vil sandsynligvis udnytte disse produktionserfaringer til at forøge størrelsen. Fremstillingen er kompliceret, men der er opnået virkningsgrader på helt op til 18% og cellerne udviser en god stabilitet.

2.7 PEC cellen

PEC cellen, den fotoelektrokemiske solcelle, er en helt speciel type tyndfilmcelle. Der har været forsket i PEC cellen igennem mange år, men de banebrydende resultater er opnået indenfor de sidste 10 år af den schweiziske kemiker, professor Michael Grätzel fra universitetet i Lausanne. PEC cellen er billig at fremstille, er i dag udviklet i størrelser på 1 m² med en ydelse i laboratorieforsøg på 7-8%.

PEC cellen virker principielt som fotosyntesen. Når en proton rammer farvestoffet (det får tilført energi) overføres en elektron til titandioxiden. Herefter bevæger elektronen sig gennem titandioxidlaget – anastaselaget – hen til kontakten tindioxid SnO₂. Farvestoffet opsamler den manglende elektron fra elektrolytten. På bagsideelektroden sker der den modsatte reaktion, herved bevæges elektronerne fra bagsideelektroden til forsideelektroden.

PEC cellen består af et halvledermateriale (elektroden) i form af titandioxid TiO₂ samt et farvestof. Titandioxid er velkendt som bestanddel i hvid maling og tandpasta. Titandioxiden og farvestoffet konstrueres i et sandwichelement mellem to lag glas, det yderste er tyndt mens det inderste oftest er hærdet. Cellerne serieforbindes. På Teknologisk Institut benyttes en vakuumrude, der er bygget op af to lag glas, forsynet med afstandsholdere og forseget, så der mellem de to glasflader forbliver luftomt. På nuværende tidspunkt har vakuumruden en U-værdi på 0,7. Målet er at få u-værdien ned på 0,4.

Titandioxiden antager en porøs form gennem dens kuglestruktur, hvorfor der opstår en stor overflade omkring cellerne. Dette giver mulighed for, at farvestoffet kan knytte sig til molekylerne og samtidig kan elektronerne bevæge sig igennem strukturen.

Farvestoffet kan baseres på et antal af farver. Kravet er, at farvestoffet er stabilt, fordi farvemolekylet altid vil slides ved lyspåvirkning. De farver, der benyttes på Teknologisk Institut, er det blåviolette N3 molekyle, den generelle 'ruteniumkompleks farve' og det mørkeblå/sorte 'The black due' N719. Ud over krav til farvestoffets absorptionskurve (her i forhold til solens stråler) er det væsentligt, at det sidder godt fast på titandioxiden.

Hvis cellen er helt transparent, er ydeevnen ikke ret stor. Denne type celle er brugt i Swatch uret, hvor cellen sidder i urglaset.

PEC cellen kan bruge lys fra andre lyskilder end solen. I supermarkeder findes f.eks. elektronisk prismærkninger forsynet med PEC celler.

Materialerne til fremstilling af PEC cellen er billige bortset fra farvestofferne, som benyttes i meget begrænset omfang. Der er ikke krav om et dyrt produktionsudstyr og elementerne kan produceres med en høj grad af fleksibilitet.

Fordelene ved PEC cellen i forhold til andre solceller:

Har en lille temperaturfølsomhed
Mindre følsom overfor lysfluktationer
Opbygges direkte som moduler uden ekstra emballage
Arkitektonisk fleksibel
Kan erstatte tagmaterialer
Kan kombineres med højisolerede vinduer
Kan udvikles til at indeholde en spektral- og retningsbestemt selektivitet
Industrielt lavere up-front investeringer
Billigere materialer
Billigere produktion
Stor produktionsvariation
Voksende marked
Specialiserings egnet

I Danmark foregår forskningen i PEC cellen i et samarbejde mellem Teknologisk Institut og Risø, Roskilde. Udvikling af den allerede kendte teknik af Gräzel er udgangspunktet. Forskningen skal bidrage med nye teknologier for at udvikle højere ydelse og bedre holdbarhed. Aktiviteterne på Teknologisk Institut koncentrerer herudover omkring at udvikle cellen til, at den bliver mere attraktiv indenfor produktioner, der kendes i dag.

- Der arbejdes på at udvikle en forseglingsteknik af cellen, der tillader en acceptabel levetid.
- Udvikling af produktions teknikker baseret på kendte teknikker, for at gøre PEC cellen attraktiv for en industriel udvikling.
- Udvikling af designparametre, der sikre at arkitektoniske værdier for bygningsintegration er tænkt ind i PEC cellens udviklingsprogram og for at opnå et produkt, der høster potentialer af, at cellen kan udvikles fleksibelt.
- Idet cellens konstruktion er som en sandwich mellem to lag glas, er der mulighed for lysindtag. Dette dagslysindtag kan kontrolleres via forskellige variationer over cellerne så der kan arbejdes med intensiteter indenfor farver, translucens, transparens, skyggeeffekter m.v. Modulet kan herved udgøre en multifunktionel facadekomponent.

På Teknologisk Institut er der planer om at udvikle PEC celle modulet til at indeholde en retningsbestemt selektivitet. Det betyder, at cellen absorberer stråler fra en bestemt vinkel, f.eks. solens kraftige lys midt på dagen i sommermånederne. Denne retningsbestemte selektivitet er usynlig, da den er nanostruktureret. Sammen med den spektrale selektivitet vil det bevirke, at bygningselementet i sig selv kan variere indtaget af varme og lys samtidig med, at det producerer elektricitet.

2.8 Spektral selektivitet – transmission, absorption, refleksion

For at kunne manipulere med solcellekomponentens egenskaber i klimaskærmen må man forstå dens samspil med lyset.

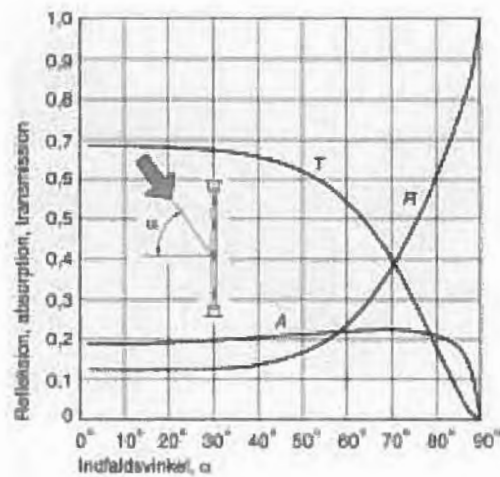


Rum dannet med et gardin af mos, hvor lyset filtreres igennem og spejles i vandet. Adriaan Geuze skabte dette temporære rum til en festival i Charlestown, USA i 1997.

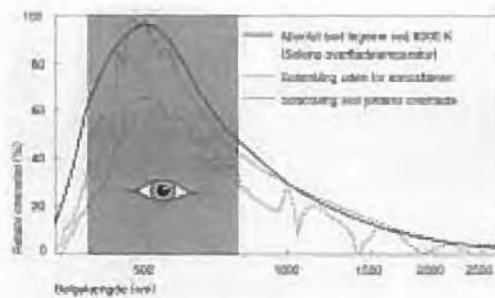
Den elektromagnetiske stråling, solstrålen, er den principielle energi, der giver både lys, varme og elektricitet. For en optimal fordeling af solens energi må strålernes indflydelse på disse faktorer defineres.

Spektral selektivitet i klimaskærmen belyses gennem, hvordan solens stråler fordeles mellem *transmission*, *refleksion* og *absorption* i solcellen/glasset.

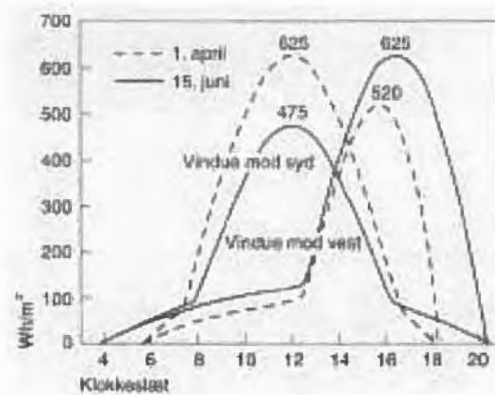
Sollysets indfaldsvinkel og facadens orientering (mod syd) har også indflydelse på fordelingen mellem transmission, refleksion og absorptionen. Glasset mod syd har relativt mere solindfald forår og efterår end sommer, hvorimod det er modsat for glasarealer mod øst og vest.



Fordeling mellem transmission, refleksion og absorption i tolagsrude med almindeligt klart glas. Illustrationen viser, hvordan fordelingen varierer efter solindfaldsvinklen for den direkte solstråling. (14)



Fordeling af bølglængderne mellem transmission, absorption og refleksion i almindeligt klart glas. (15)



Solindfaldet gennem 1 m² dobbeltrude der er henholdsvis syd- og vestvendt, forår og sommer. (16)

Transmission



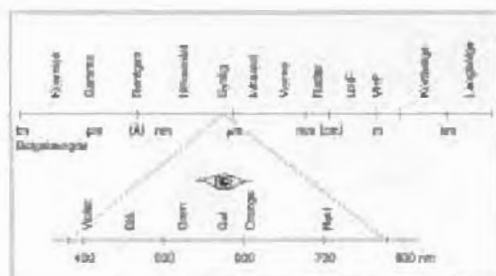
Installation kun oplyst via bevægeligt lys 'shadows of brightness' transmitteret gennem lamelleme. Tom Heneghan har lavet dette permanente rum 'Heaven Chamber' på Tateyama Museum, Toyama Performance i Japan i 1995. (17)

Solens stråler ved jordoverfladen ligger i bølgeområdet 300 til 3000 nm. Bølgelængder på mellem 380 (violet) og 780 nm (rødt) er synlig stråling. Bølgelængder under 380 nm er ultraviolet mens bølgelængder mellem 780 og 3000 nm er infrarød varmestråling. Den ultraviolette stråling udgør kun 6%, mens den synlige stråling er omkring 50% og de 44% er den infrarøde stråling. Glasset transmitterer stråler i bølgeområdet 300 til 3000 nm. Lyset transmitteres gennem glasset, hvis glassets molekylære strukturer er mindre end bølgelængderne fra solens stråler. Den største lystransmission tillader flest mulige bølgelængder at passere gennem glasset. De bølger der ikke transmitteres vil enten blive absorberet eller reflekteret.

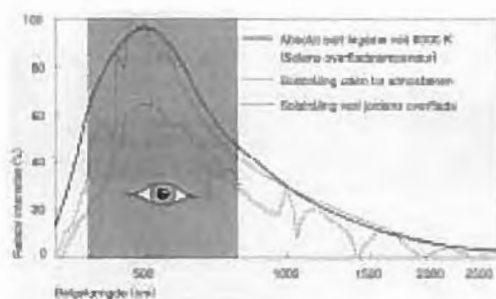


Gennem denne prisme ændre det direkte sollys retning og spredes som diffust lys. (18)

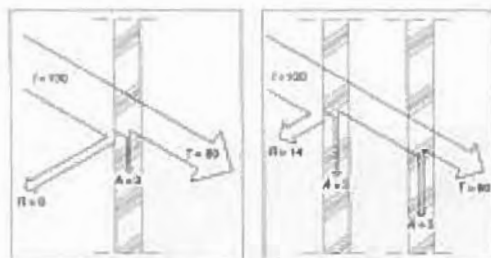
Solstrålen brydes i forskellige retninger, enten når den rammer glassets overflade eller partikler i/eller imellem glasset. Herved opstår en retningsændring af lyset og, i tilfælde af at lyset spredes i mange retninger, et diffust lys. Dette bløde lys fordeles længere ind i rummet end det direkte lys, hvilket kan benyttes bevidst til en optimering af dagslyset evt. i kombination med direkte lys.



Det elektromagnetiske spektrum, med detaljering af den synlige stråling. (19)



Solstrålemes fordeling over bølgelængdemne. (20)



Fordeling mellem transmission, refleksion og absorption i henholdsvis etlags- og tolagsrude. (21)

Absorption

Alle materialer absorberer lys på forskellige stadier. De fleste overflader har selektive refleksioner, hvilket medfører, at de ikke transmitterer alle bølgelængder. Absorption kommer til udtryk i en farvning og i varme. Absorberet stråling opvarmer glasset, som afgives til den indvendige og udvendige overflade.



Facaden på Peter Zumthors 'Kunsthhaus Bregenz', Østrig, er beklædt med glasskiver der er friholdt konstruktionen. Glasset absorberer det skiftende lys fra himlen og refleksioner fra søen. (23)

Kombinationen af alle de synlige bølgelængder giver hvid, mens de enkelte bølgelængder i princippet kan defineres indenfor de tre primærfarver rød, grøn og blå. Når det almindelige soda-lime glas får et grønligt skær skyldes det tilstedeværelsen af jernoxid i glasset, hvis atomiske strukturer absorberer røde bølgelængder og transmitterer det grønne, der er komplementærfarven.



Rumlighed opbygget af standard flaskekasser belyst udefra. Et filter med varierede spil mellem lys, skygge og farver opstår indefra, udefra virker strukturen massiv. Wolfgang Winter & Berthold Hörbelt har lavet 'Crate Building' 1128.8/639.9 til 'Skulptur Projekte' i Münster, Tyskland, 1997. (22)

Refleksion

Der vil altid være en grad af refleksion når lys partiklerne rammer overfladen af glasset, både på vej ind og på vej ud af glasset. Lyset reflekteres med samme udfaldsvinkel som indfaldsvinkel. Den synlige bestråling, farven på en belyst overflade, afhænger af mængden af stråler reflekteret og absorberet for hver bølgelængde. F.eks. reflekterer en rød overflade de 'røde' bølgelængder og optager resten.

Det optiske spil i brydning og refleksion af lyset kendes fra spejle eller de polykrystallinske siliciumceller og kan have stor æstetisk værdi



Spejling i glastrude. (24)



Spejlglass monteret horisontale glasfiner skaber en visuel dybde. Lysets skiftende, himlens farver og skyerne spejles i facaden og danner et spil af lyseffekter, et billede på dagens skiftende forhold i et urbant kontekst. Facaden 'Dichroic Light Field' er designet af James Carpenter i New York, USA, 1995. (25)

- (13) *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 75, Jeoren Musch
 (14), (15), (16), (19), (20), (21). *Glas i byggeriet*, Carl Axel Lorentzen, SBI-ANVISNING 1999, Figur 13, 14, 15, 9, 10 og 11.
 (17). *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 137, Tom Heneghan
 (18). *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 213 ill. 6. Lukas Roth.
 (22). *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 86, Roman Mensing
 (23) *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 83, Christian Richters
 (24) *Glass in Building*, David Button and Brian Pye, Pilkington, Butterworth Architecture 1993, Figure 4.10. Flachglas AG
 (25) *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 85, James Carpenter Design

2.9 PEC cellen og den spektrale selektivitet.

PEC cellen udgør i sig selv en komponent, der indeholder et antal af muligheder for at integrere de klimaregulerende såvel som æstetiske værdier.

Ved at lade solens stråler trænge imellem og gennem PECcelle-komponenten opstår et lysindtag med både direkte og diffust lys, der tegner solens bevægelser og foranderlighed. Denne variation i lystes bevægelse over døgnet og kontakten mellem ude og inde gør at facaden opleves som et optisk filter mellem det indre og ydre klima.

Indtag af solens lys og varme kan styres således at det indgår som en grundlæggende parameter for indeklimaet. Samtidig fremhæves solcellens udtryk, idet man kan opfatte eller 'gennemskue' den energioverførsel der foregår fra solens lys til elektricitet, ligesom vi kender det fra lysets brydning gennem planternes blade, fotosyntesen.

I udviklingen af PEC cellen kan der arbejdes med den spektrale selektivitet, der styrer hvilket område af lysspektret solcellekomponenten optager og hvilke, der trænger igennem komponenten.

PEC cellens farvestof er udslagsgivende for komponentens lys-transmission. Farvens absorption af bestemte lysstråler vil komme til udtryk en farvning af komponenten i komplementærfarven. Grätzels gruppe har fundet op mod 700 farvestoffer der kan bruges i PEC cellen. Herunder farver indenfor det infarøde område, hvilket betyder, at cellerne absorberer de usynlige/farveløse solstråler. Dette forhold kan benyttes til optimering af lysindtag og begrænsning af varmeindstråling. Koncentrationen af det synlige farvestof er afgørende for hvor meget lys, der optages, og derved hvor meget lys, der trænger igennem elementet, samtidig er det muligt at blande farvestoffer.

Cellens diffusitet afhænger af partikelstørrelsen i titandioxiden. Hvis partiklerne er mindre end lysets bølgelængde kan lyset ikke vekselvirke med partiklet og lyset stråler lige igennem. For en diffuserende effekt skal titandioxiden findes i form af større partikler. Dette har andre fordele, idet lyset kastes rundt blandt farvestofferne og derved forøger chancen for, at de bindes. Herudover gælder, at jo mindre partiklerne er jo større overflade har de og derved kan flere farvestoffer absorberes. Store og små titandioxid partikler kan blandes i cellen. Endelig har glassets farve (indhold af f.eks. jern) og dets tykkelse og evt. antirefleksbehandling en indflydelse på hvor meget lys der transmitteres.

2.10 Solcellers anvendelse

Der er i de senere år fundet et utal af anvendelsesmuligheder for solceller. De findes i lommeregner, parkometre, telefoner ved motorvejene, solbiler, der kører ræs tværs over Australien, solfly, solbåde og kamelkøleskabet til turen over ørkenen og store solkraftværker bl.a. i USA's ørkenområder. Der var sågar planer om at lave et kæmpe anlæg i rummet. I lande, hvor elnettet ikke er udbredt, bruges solceller til lokale vandpumper, medicinkøleskabe, radioer m.v.

Der er primært to typer anlæg, de enkeltstående solcelleanlæg (stand alone anlæg), hvor elektriciteten enten bruges direkte eller lagres i batterier. Den anden type anlæg er de nettilsluttede anlæg.

I Brædstrup i Danmark har elforsyningselskabet EnCon nettilsluttet 30 parcelhuse med solcelleanlæg. I projektet SOL 300 også ledet af EnCon, gentages forsøget med ca. 300 enfamiliehuse i 7 områder fordelt på Fyn og i Jylland. Projekterne har, udover at tilføre husstanden elektricitet, skabt en synliggørelse af forbrug og egenproduktion ved hjælp af et installeret solcellemeter, der måler produktion og forbrug af elektricitet. I SOL 300 gav dette en gennemsnitslig besparelse på elforbruget på 10% pr. husstand.



Luftfoto fra Brædstrup, SOL-300. (27)



Solcelleanlæg på enfamiliehus samt som halvtag, SOL-300. (28)

På vores breddegrader placeres solcellepaneler mest optimalt, mod syd med en hældning på 35%. Ved en lodret placering forringes effektiviteten med 20-30%, til gengæld bliver effektiviteten størst om vinteren, hvor solen står lavere på himlen. Hvis en del af en solcelle beskyttes af slagskygge, selvskygge eller hvis der ligger noget på panelet, sætter anlægget ud, da det er serieforbundet. Ved installation af en friløbsdiode kan det sikres at kun det enkelte modul sætter ud. Ydelsen for polykrystalinske solceller er ca. 1 KW pr. 10 m². En gennemsnitshusholdning på 4 personer har et årligt forbrug på ca. 3000 KWh, hvilket svarer til et solcelleareal på 35 m².

Byggematerialer med integrerede solceller

Der er mange øvelser i gang med integrering af solceller i byggekomponenter. En del elementer er i produktion og endnu flere under udvikling. Det er tydeligt at 'øvelsen' er ny og at der endnu ikke findes overbevisende produkter.

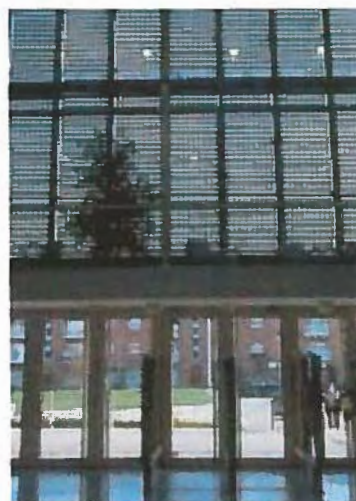
Eksempler på danske produkter udviklet med solcelleintegration er:

- UniSolar-elementer bestående af tyndfilm solceller på stålplader med isolering bag. Sælges i metermål.
- Dansk Eternit har til Sundby hospital udviklet eternitskiffer, hvor siliciumsolceller er monteret direkte på eternitten. Et problem med de forholdsvis små moduler er alle de elektriske samlinger.
- Velux har udviklet ovenlysninduer med polykrystalinske solceller i termoruden.

Hvis solceller skal have chancer overfor alternative billige energikilder, må der udvikles en billigere teknik med højere effektivitet gennem anvendelse af nye materialer og en stadig udvikling af den tekniske løsning. Herudover ligger der potentialer i at tænke solcellen som en del af et byggekomponent, hvor materialerne samtidig indgår som en del af klimaskærmen, og derfor får en dobbeltfunktion. Samtidig kan solcelleelementet i et tværfagligt samarbejde udvikles til et aktivt element i klimaskærmen, der bidrager med tiltag til indeklima, som forvarmning af ventilationsluft, passiv opvarmning og dagslysindtag. Ved denne multifunktionelle løsning, kan solcellepanelets værdi ikke kun gøres op i tilbagebetalingstiden udregnet efter hvornår der er produceret elektricitet til at tilbagebetale omkostningerne for solcelleanlægget. På samme måde som man heller ikke definerer tilbagebetalingstid for en mursten!



Bibliotek i Mataró, Spanien af arkitekt Miquel Brullet i Tenas. Den sydvendte facade er beklædt med polykrystallinske silicium celler. (29)



Hovedindgang. (30)



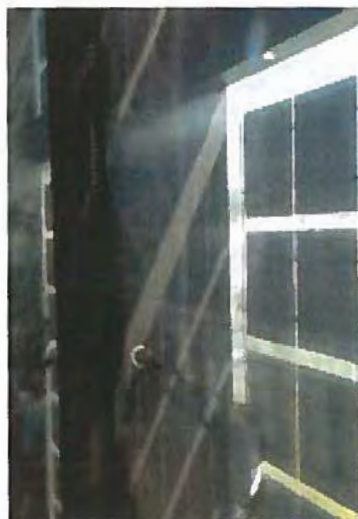
Bibliotekssalen set mod den translucente solcellefacade. (31)



Den translucente facade virker som et filter, der ud over det behagelige dagslysindtag, tegner byen gennem filteret og skaber en distance til hverdagen og en fordybelse i det nære, bøgerne. (32)



Solcelle facaden er en dobbelt konstruktion af 2m2 præfabrikerede moduler. Om vinteren forvarmes luftindtag. Om sommeren bruges luftgennemstrømningen til at køle solcellemodulerne. (33)



Solcellemodulet set indefra. (34)

(27-34). Ellen Kathrine Hansen
Fig. 2. BPS Solceller i byggeriet, Publikation 128, januar 2000, fig. 27, p.14.

2.11 Litteratur

<http://hem.passagen.se/aaked/solcell.thm> Rapport fra KTH
Södertälje, 1996-97, af bl.a. Åke Djärf, den 18. januar 2001
<http://www.dr/videnom/11solcel/fotovolt.htm>, den 18. januar 2001
<http://www.solenergi.dk/nydesign/pages/typer.htm>, den 18. januar
2001
<http://www.solenergi.dk/pec/htm>, den 18. januar 2001
<http://www.dansksolenergi.dk/solceller.htm>, den 18. januar 2001
BPS 128 Solceller i Byggeriet, januar 2000
Statusrapport for Solcelleanlæg, Juni 1999, Ivan Katric,
SolenergiCenter Danmark

3. SOLlyset, betydning og potentialer i arkitekturen

I arkitekturen har der altid været en interesse for anvendelse af lyset som udtryksmiddel. Ud over at lyset har en funktionel begrundelse bruges det også til at danne rum, gøre opmærksom på overfladers karakterer og beskrive tidens gang. Glasset fungerer som det filter i klimaskærmen, der giver lyset adgang til bygningen. Illustrationer af udvalgte værker fra arkitekturhistorien sætter temaet, glasset i klimaskærmen, ind i en bygningskulturel sammenhæng. Samtidig belyses de nye krav til glasset i den multifunktionelle facade. Lys tænkes sammen med varme og energiindvinding, i et æstetisk og funktionelt perspektiv.



Solen er på tværs af traditioner, religioner og kulturer betragtet som en grundlæggende kraft. (35)



Skyggen, den bedste parameter til at tegne lyset (36)

(36). *Architecture Without Architects*, Bernard Rudofsky, Academy Editions. 5. udg. 1981, ill. 82 Marcel Griaule, *Collection, Musée de l'Homme*

3.1 Dagslyset i arkitekturen



Denne kuppel i et tyrkisk bad, fremstår som en stjernehimmel i bevægelse. (37)



Det himmelske lys, her udtrykt i Hagia Sophia i Konstatinobel, hvor rumligheden baserer sig på lysindtaget og dets refleksioner. (38)

Lyset er grundlæggende for oplevelsen af rum. Le Corbusier taler om arkitektur som 'The marsterly, correct and magnificent play of masses brought together in light'. Lyset er så essentielt for arkitekturen som lyden er for musikken.



Romerne udnyttede også kvaliteten i det direkte lysindtag, her i Panteon i Rom. (39)

Ud over lysets funktion til belysning af rum og genstande, har dagslyset en stærk indflydelse på såvel vort psykiske som fysiske velvære. Vores optiske perception, dags- og årstidsrytme er udviklet

efter dagslysets kvaliteter. Der findes derfor grundlæggende potentialer i at integrere det direkte sollys i vores rum. Især kan det direkte lysindtag skabe det uforudsigelige lysspil, der er så grundlæggende for vores kontakt til naturen,- det store (himmel)rum.



Maleriet af Pieter de Hooch fra national Gallery i London, England viser kvaliteten i dagslysendtaget gennem de blyndfattede ruder samt betagelsen af glasset som materiale. (40)

37. *Architecture Without Architects*, Bernard Rudofsky, Academy Editions. 5. udg. 1981, ill. 154, Direction Générale de la Presse ua Ministère de l'Interieur, Ankara, Courtesy Dr. Myron, B. Smith, Islamic Archives.
38. *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 98 ill. 1. Cyril Mango, *Weltgeschichte der Architektur. Byzanz, Electa/ DVA*.
39. *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 90 ill. 6. Lukas Roth
40. *Glass in Building*, David Button and Brian Pye, Pilkington, Butterworth Architecture 1993, Figure 1.9, National Gallery, London UK

3.2 Glasset i arkitekturen

Dagslyset i bygningerne hænger sammen med glasset. Dette uorganiske materiale er produceret i over 4000 år. Det tog 2000 år fra man opfandt glasset, til romerne udviklede fladt glas og brugte det i bygningernes åbninger. Glasset i arkitekturen har skabt muligheder for at beskytte mod klima, trække lys og varme ind og derved styre indtaget af solens energi.

Det er bemærkelsesværdigt, at den kemiske proces, der er brugt til fremstilling af glas til bygninger stort set har bygget på de samme principper igennem 2000 år. Derimod har nye fremstillingsprocesser og ikke mindst sekundære behandlinger af glasset haft stor indflydelse på udviklingen af glasset som byggeprodukt, og derigennem skabt nye muligheder i arkitekturen.

Romerne udviklede, som før nævnt, teknologien til at glasset kunne bruges som vinduesglas. De brugte glasset i små dybe huller i den tunge murede facade.



Hagia Sophia i Konstantinopel fra år 538. (41)

I de gotiske katedraler blev glasset til ornamenter, hvor farvet glas skabte imponerende billeder i fine småsprossede strukturer.



Gotikken er med dens dynamik, lethed og transparens en modsætning til romernes tunge stil. (42)

I forbindelse med støbejernets indtog i det 19. århundrede åbnedes muligheden for at arbejde med lette konstruktioner og facader fyldt ud med glas. Denne byggestil står i modsætning til vores klassiske opfattelse af bygningen bestående af en tung mur med huller i.



Hallidee Building i San Francisco, USA fra 1893 er et eksempel på en af de første curtainwalls. Bygningen er en jembetonkonstruktion, hvorpå facaden er ophængt i en stålramme. Arkitekten Willis Polk skabte facaden som et resultat af udviklingen indenfor jembeton- og stålindustrien. (43)

Dette satte skub i glasproduktionen og i 1830'erne udvikledes glasstykker på op til 1 x 1,3 meter mod de traditionelle rudeglas på max 0,75 x 0,5 meter. Anvendelsen af de nye store glasstykker ses bl.a. i de store væksthuse og overdækkede haller fra den tid.



De overdækkede markeder skabte et komfortabelt og luksuriøst rum, der især i Frankrig vandt udbredelse som de første stormagasiner. Her Printemps. (44)

I slutningen af det 19. århundrede udvikledes presset glas, glasbyggestenen. La Maison de verre i Paris er et forbilledligt eksempel på udnyttelsen af disse.



La Maison de Verre i Paris, Frankrig af arkitekten Pierre Chareau er fra 1928. Bygningen er et af de tydeligste eksempler på tidens avant garde stil, hvor moderne design og rumlighed bygger på nye teknologiske løsninger. (45)

I begyndelsen af det 20. århundrede blev glasset igen midlet til at skabe et nyt arkitektonisk udtryk. Idealet var 'glasarkitektur' som lader omgivelserne tegne sig i rumlighederne, ikke gennem nogle få vinduer men gennem facader helt af glas. Denne type lette facade kaldes curtainwall. Facaden er ikke bærende og kan derfor udformes med helt nye friheder.

Dette kommer til udtryk i Mies Van der Rohes projekt til en glasskyskraber til Berlin Udstillingen i 1922. Her understreger han tilmed glassets refleksioner og den fleksible konstruktion ved at knække fladerne, så bygningens hud får en sprød karakter.



Mies Van der Rohes forslag til en glasskyskraber. Han forklarede tårnet ud fra grundidéerne; lysets spil i rummene, bygningens lethed i gadebilledet og lysets spil og refleksioner i glasset. (46)

- (41) Sol Powe, *The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 99, ill. 5.
(42) Sol Powe, *The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 103, ill. 5. Hirmer Fotoarchiv, Munich.
(43) *Glass in Architecture*, Michael Wigginton, Phaidon Press Ltd. 1996, p. 01.54, fig. 85, Michael Wigginton.
(44) Sol Powe, *The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 147, ill. 7. Bernard Marias. *Les Grandes Magasins des origines à 1939*, (Picard) Paris 1979.
(45) *La Maison de Verre*, GA 1988, p. 31. Yokio Futagawa.

3.3 Klimaskærmen

Det blev efterhånden muligt at skabe en kunstig komfort i bygningerne v.h.a. glas og anden teknologisk udvikling, der modvirkede den svingende solenergi. Resultatet er, at man i betagelsen af den fuldstændige mekaniske klimakontrol har bevæget sig væk fra bygningens direkte relation til det naturlige klima.

Som følge af energikrisen i 1970'erne begyndte en udvikling indenfor glasteknologierne mod udvikling af glas med lave K-værdier, hvilket afledte de hermetisk lukkede og isolerede huse betegnet 'glukhulsarkitekturen'. Reaktionen blev i visse tilfælde, at man applikerede solfangere og senere solceller kritikløst på husene.

I dag er der langt større fokus på værdier, som bygger på naturens mangfoldighed og vores grundlæggende kontakt til klimaet og omverden. Måden bygningen forholder sig til det naturlige klima er blevet en betydningsladet værdi. Dette har i de seneste 25 år præget udviklingen af avancerede glastyper, hvor komfort og oplevelsen af rumligheder samt kontakt til omgivelser og naturens variationer er tilstræbt i en holistisk bearbejdelse af klimaskærmen.

Glaspartier i klimaskærmen behøver ikke længere at blive betragtet som energitabere, men kan vurderes efter deres evne til at opfange lys og varme samt generere energi. Derved opfattes klimaskærmen som huden mellem inde og ude, der optager naturens ressourcer i et symbiotisk forhold til omgivelserne. Dette har ændret vores syn på klimaskærmen og forholdet til omgivelserne, hvilket bl.a. kommer til udtryk i arkitekturen ved indførelsen af atriums og dobbelte curtainwalls. Disse tiltag tegner husene som klimaapparat, hvor samspillet mellem det naturlige klima og interiørets klima tegnes i arkitekturen. Uddannelsescenteret i Herne-Sodingen i Tyskland, Reigstag i Berlin, og Ikast Seminariet i Danmark er to eksempler blandt de mange på dette. Fremtidens arkitektur har store muligheder for at udvikle disse teknologier og tilføre vores bygninger nye udtryk.



(47)



(48)



(49)



(50)

(47) Ombygningen af Reichstagsgebäude i Berlin af arkitekt Norman Foster er et eksempel på hvordan ressourcebevidsthed kan være bærende for et arkitektoniske udtryk og image.

(48) På taget er der anlagt et 300 m² stort solcelleanlæg, der forsyner Rigsdagen med elektricitet.

(49) Midt i bygningen er der etableret en glaskuppel, der udover den identitetsgivende virkning, via en indre dobbeltspiral, fungerer som offentligt tilgængeligt rum og vindue mod verdenen. I kuplen er der integreret unikke energikoncepter. De 360 spejle i den tragtformede korpus reflekterer dagslyset ned i salen.

(50) En computerstyret solafskærmning styrer lys og varmeindtag. Herudover er der installeret naturlig ventilation, der ses øverst i kuplen samt varmegenvindingsanlæg. Opvarmningen foregår ved afbrænding af Bio-Diesel og overskudsvarme lagres i underjordiske lagre ved hjælp af naturlige forekomster af saltholdigt vand.

Kravene til et indendørs komfortabelt klima baseret på en tættere kontakt og direkte brug af solens energi bliver stadig større. Der er i stigende grad krav til optimal belysning af arbejdspladser for en optimering af arbejdsklima og derved forøget effektivitet. Større krav til lysets underbygning af omgivelser og rumligheder, individuel kontrol af lys og klimamæssige forhold samt bedre kontakt til omgivelserne. Disse krav skal indeholdes i de multifunktionelle facadesystemer, der benytter solens lys og varme optimalt og derigennem sikre et behageligt klima termisk såvel som oplevelsesmæssigt.

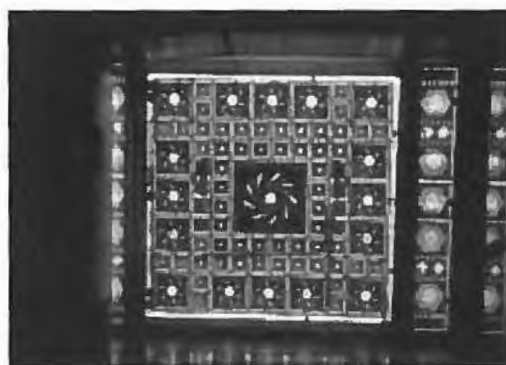
Dette medfører en holdningsændring til bygningernes udtryk, vores vaner, levemåder og ikke mindst forståelsen for, at forholdet mellem ude og inde er en værdifuld parameter.

3.4 Nye teknologiske glaskomponenter

Fremtidens multifunktionelle glasfacader bygger på udviklingen af bygningens 'hud', klimaskærmen, som en bæredygtig klimaregulerende og energiproducerende facade. De forskellige teknikker baseres på styring af lys- og varmeindtag fra solens energi.

Nye produkter og systemer udvikles. Bygningerne bliver komplekse, holistiske systemer, hvor integration af sol-teknologi er bærende for udformningen.

Der er op gennem det 20. århundrede eksempler, hvor bygningernes mekaniske klimaskærme er bevægelige i forhold til vejrets skiften. Et kendt projekt er 'Det arabiske Institut', 'Institut de Monde Arabe', i Paris af arkitekten Jean Nouvel. Her er den sydvendte high tech facade applikeret med forstørrede foto-optiker, der åbnes og lukkes efter dagslysets styrke. Facaden er i sin ornamentik imponerende, men den skal også ses som et prestigeprojekt, der afspejler tidens ypperste teknisk formående.

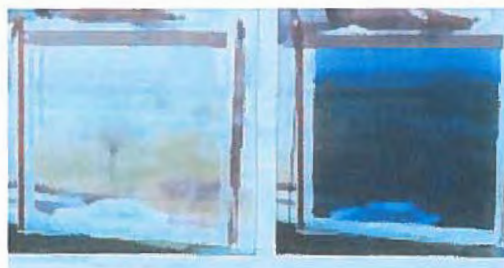


Det arabiske Institut.
Facadekomponent ca. 2 x 2 m med
integreret regulering af solindfald.
(51)

En afløser til de mekaniske systemer er 'solid state'. 'Solid state' er en teknisk fremstilling af materialer, der på baggrund af elektroniske og molekylære processer kan ændre egenskaber og karakter. De såkaldte 'intelligente huse', er bygninger, der som en camelon optager omgivelsernes karakter/forhold i sig.

I dag er der ambitioner om at anvende 'solid state' i udviklingen af teknologier som gør brug af variable transmissioner. Dette opnås ved at anvende teknologierne 'electrochromism' (reagerer på en elektrisk påvirkning), 'photochromic' (reagerer på lys) eller 'thermochromic' (reagerer på varme) materialer. Ændringerne ved de respektive påvirkninger varierer stoffernes udtryk. Elektrokromt glas, der ændre varme- og lysgennemtrængning som resultat af en lille elektrisk strøm, er foreløbig det mest brugte. Ved strømpåvirkning aktiveres

lagene og de skifter farve, hvorved lys og varmegennemtrængning ændres. Ved at fjerne den elektriske gennemstrømning føres materialet tilbage til dets originale stadie.



Elektrocromic glas, skifter karakter på få sekunder ved elektrisk påvirkning. (52)

Der forskes også i glas som kommunikationsmedium gennem 'electroluminescent display' teknologi. Her bliver facaden et elektronisk display med information eller blot et mønster gennem variationer i farver og lysgennemtrængning.

Toyo Ito's 'Tower of Winds' i Yokohama, Japan fra 1986 er et eksempel på electroluminescent display. Om aftenen oplyses den transparente acrylhud af et hav af lyseffekter. Lysene styres af en computer, der aflæser byens støj- og vindforhold og transformere disse værdier til et lys-sceneri. Den oplyste acrylbeklædning dækker for et vand og ventilationstårn, der om aftenen forvandles til et stort barometer der tegner Yokohama's urbane klima.



'Tower og Winds'. (53)

Ved renoveringen af operaen i Lyon, har den franske arkitekt Jean Nouvel installeret kameraer ved publikumsindgange, scenedøre og personaleindgange. Bevægelserne af folk bliver herigennem registreret og transformeret til elektroniske impulser, der gengives i farvet lys fra pink til højrrød i tagets hvælv.



Théâtre Temps, Operaen i Lyon, Frankrig, 1993. (54)

Solceller er et seriøst svar på et teknologisk produkt, der kan indgå i bygningskomponenter som et energiproducerende element. De konventionelle solceller består af grundstoffet silicium. I de seneste år har forskningen koncentreret sig omkring de forskellige tyndfilmceller, herunder PEC cellen. Disse celletyper er lettere at fremstille, kræver ingen eller meget begrænset mængde silicium og kan produceres med forskellige egenskaber, herunder lysgennemtrængelighed.

Solceller integreret i klimaskærmen udgør et komponent, der åbner for et utal af muligheder for at styre lysindfald, varmestråling, fordeling af lys og udsyn/indsyn. Derfor kan solcellen udvikles til at indeholde klimaregulerende såvel som æstetiske parametre.

Kilder:

(51) Carsten Rasmussen

(52). *Glass in Building*, David Button and Brian Pye, Pilkington, Butterworth Architecture 1993, Figure 9.27. Pilkington Group Research, Lathom, UK. Pilkington Technological Centre.

(53) *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 23, The Japan Architects

(54) *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 78, Yann Kersalé

3.5 Litteratur

Glass in Buildings, David Button and Bryan Pye, Pilkington,

Butterworth Architecture 1993

Glass in Architecture, Michael Wigginton, Phaison Press Ltd.

London 1996

Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Herzog, Thomas,

Prestel 1996

Intelligente Glasfassaden, Material, Anwendung, Gestaltung, Andrea

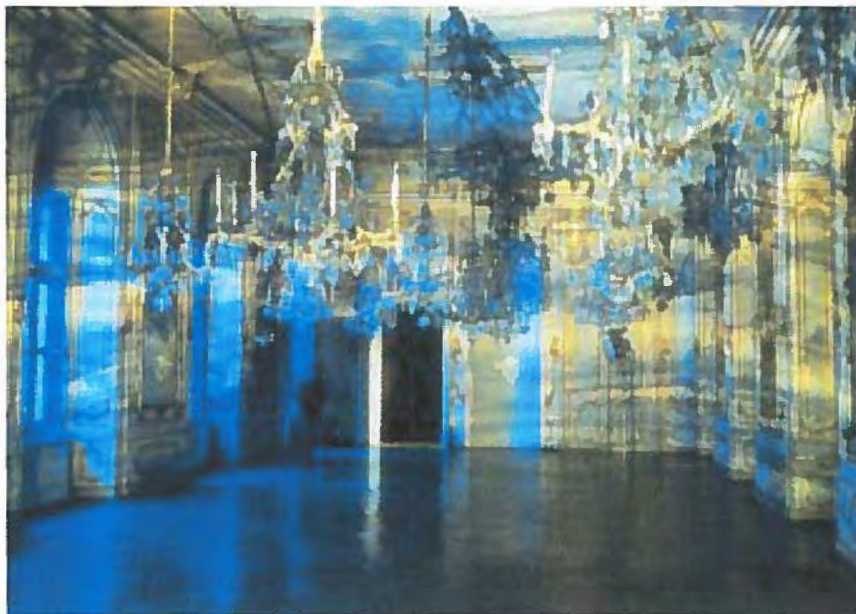
Compagno, Birkhäuser Publisher 1999

Arkitektur og Naturopfattelse, PhD afhandling, Lotte Bjerregaard,

AAA 2001

4. Arkitektoniske potentialer i fremtidens solceller

Før solcellen bliver en komponent der er en naturlig del af vores bygninger skal de integreres kulturelt. Vores bygninger er en spejling af kulturelle værdisætninger, der bygger på en dyb forankring i vores opfattelse af det at bygge og bo. Derfor er det væsentligt at forstå sammenhængen mellem bygningen/komponenten, kulturen og naturen.



'The Organic and the Crystalline Description', af Olafur Eliasson, er en mixed-media installation med farvede lys-projektioner, glas og konvekse spejle. Neue Gallerie i Graz, Østrig, 1996. (55)

4.1 Teknologien møder kulturen

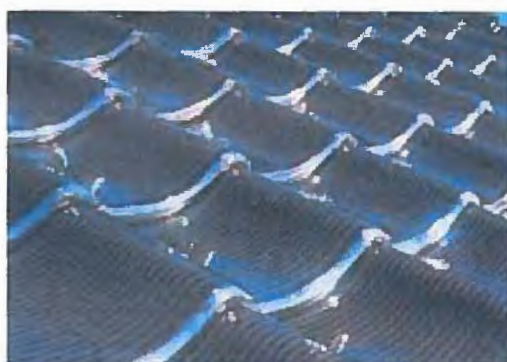
Der er mange faktorer, der har indflydelse på hvordan nye byggekomponenter integreres i byggeriet. Vores kulturelle baggrund giver os stærke værdisætninger for, hvordan vores bygninger skal fungere og fremstå. Værdierne stemmer dog ikke altid overens med de teknologiske indvindinger.

Solceller bliver ofte betragtet som et teknisk element, der skal applikeres bygningen pæneste muligt og helst 'usynligt'.



Denne illustration fra en fransk avis fra 1950'erne viser, hvordan man forestillede sig solcellerne brugt i byggeriet. (56)

Umiddelbart har vores integrering af solceller i byggeriet ikke udviklet sig meget. Der er en tilbøjelighed til at krænke teknologien ned over traditionen i en overbevisning om at det romantiserede billede af bygningen kan overføres til fremtidens byggeri, blot ved at 'skjule' teknologien.



Et eksempel på 'usynlige' solceller er den japanske udvikling af amorfe solceller på klassiske tagsten, udviklet af Sanoy. (57)

Derimod er der meget at lære ved studiet af solcellebilerne og solcellefly. De er designet ud fra en optimering af form, teknik og funktion, hvor materialeminimering, vindmodstand og solcellernes placering har været det primære for designet. Her opleves et design, der går op i en højere enhed mellem funktion, teknik og æstetik, den klassiske treenighed, der er grundstenen i alt god design, også bygningskomponenter.



(58)



(59)

Det solcelledrevne køleskab, der bæres af en kamel tværs over ørkenen, er et fint billede på, hvordan teknologien møder kulturen. Vi tager den teknologiske udvikling til os, og sammenstillingen mellem teknologi og kultur konverteres til et potentiale, hvor 'sammenstødet' i sig selv kaster noget af sig.



(60)

(55) *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 49, Gallerie Neugeringschneider.

(57) *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 220, ill. 4. Sanoy Electric Co. Ltd., Osaka.

(58) *Sol Power The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p.222, ill. 2.

(60). *Technology Place & Architecture. The Jerusalem Seminar in Architecture*, Kenneth Frampton, Rizzoli 1998, p. 18, lecture Raymond Abraham.

4.2 Teknologien møder naturen

Der er stor fokus på værdier som bygger på naturens mangfoldighed og vores grundlæggende kontakt til denne. Facaden betragtes i højere grad som ' huden ' mellem inde og ude, der optager naturens ressourcer i et symbiotisk forhold til omgivelserne. Dette stiller krav til bæredygtighed herunder integrering af energiskabende teknologier, dagslysudnyttelse og passiv solvarme/køling. Parametre der alle baserer sig på en tættere kontakt og direkte brug af solens energi. Derfor ligger der et potentiale i at forstå sammenhængen mellem glassets og solcellens teknologier, materialernes egenskaber og muligheder og deres samspil med sollyset, ikke blot som en teknisk parameter, men også som æstetisk og betydningsmæssig parameter.

De tilfælde hvor bygningen ' samarbejder ' med det naturlige klima om at skabe et indeklima, kan bygningen betragtes som en organisme i stedet for en maskine. Den engelske arkitekt Norman Foster bruger betegnelsen ' to harvest energy ', at høste energi bl.a. via solceller. Denne sammenbinding af biologien og teknologien er speciel tydelig i PEC cellen, idet den bygger på en ' kunstig fotosyntese '.



(61)



(62)

Sollyset giver gennem fotosyntesen liv til plantefaunaen og er derigennem en smuk parallel til den energioverførsel, der sker i PEC solcellerne. Der ligger et designmæssigt potentiale i at udtrykke denne sammenhæng i solcellekomponenterne. Sammenhængen kan opleves som en ' læsning ' af hvordan teknikken fungerer. Samtidig

opleves filtreringen af lyset gennem træernes blade som en stor æstetisk kvalitet, der kan overføres til dagslysindtaget via solcellens filtrering af lyset gennem komponenten.



Lysets filtrering gennem bladene har altid været anset som effektivt. Denne japanske loggia består af bambus og klatreplanter. (63)



Vineriet i Hampton Court Palace, England. (64)



Solcelle skulptur på EXPO 2000 i Hannover, Tyskland. Solcellerne er placeret på ca. 5 m høje stænger og strækker sig efter lyset, som solsikker. (65)

(61) (62) *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 30, ill. 2, 3.

(63) *Architecture Without Architects*, Bernard Rudofsky, Academy Editions. 5. udg. 1981, ill. 153. Shokosuke Takemura. Courtesy, *This is Japan*.

(64) *Sol Power, The Evolution of Solar Architecture*, Sophia and Stefan Behling, Prestel 1996, p. 139, ill. 7. Marey Woods, arete Warren, *Glass Houses*, (Aurun Press) London 1988.

(65) Ellen Kathrine Hansen

4.3 Transparens – form, rum og lys

Klimaskærmens mange lag i betydning: de klimaregulerende, de energigenererende og de betydningsladede har potentialer i forhold til optiske og perceptionelle kvaliteter som gennemsigtighed, filter mellem inde og ude, åbenhed, antydninger, flertydighed, dybde og nærhed samt lagdeling. Disse kvaliteter dækkes under *begrebet 'transparens'*, som er et centralt tema inden for moderne arkitektur og kunst. Begrebet er op gennem det 20. århundrede blevet udviklet og benyttet til teoretisk at definere den moderne traditions fornemmelse for form og rum med lyset som en central parameter.



Installation 'The Dining Room: Mother Figure' fra Las Palmas de Canaria, Spanien, fra 1995 af Eulàlia Valldosera. Skyggen af denne krop og spisebordet projekteres gennem et gardin. På den anden side af gardinet ser beskueren imidlertid helt andre objekter, hvilket afslører at forestillingerne om skyggerne var forkerte. Installationen peger på tvetydigheden mellem det oplevede og virkeligheden med lyset som en central parameter. (66)

Begrebet transparens, det gennemsigtige, kan dække over kvaliteten eller tilstanden at være transparent både i en materiel, forståelsesmæssig og perceptionel forstand. *Materiale transparens* dækker over materialernes gennemskinnelige karakter, her lysets gennemtrængning i glasset og solcellen. *Forståelses transparens* dækker over den forståelsesmæssige sammenhæng, noget indlysende og gennemskueligt, her relationen til facadens konvertering af solens energi, menneskets forhold til omgivelserne. Og endelig *perceptionel transparens* som noget der overlapper hinanden, og er i stand til gensidigt at gennemtrænge hinanden, her optisk og rumligt. Derfor indeholder begrebet en flertydighed, der er parallel med de før nævnte lag mellem inde og ude, der indeholdes i klimaskærmen.



Herzog & de Meurons Ricola Factory i Mulhouse-Brunstatt, Frankrig fra 1993. Ricolas fabrik ligger i skovene ved Rhone floden. De frodige omgivelser afspejles i facademe, der er lavet af polycarbonate plader med silketryk. Det filtrerede dagslys giver et blødt og levende udtryk samt et godt arbejdsklima. (67)

Arkitekt maa Lotte Bjerregård refererer i sin Ph.D. afhandling 'Arkitektur og Naturopfattelse' til et interview med den tyske arkitekt Thomas Herzog. Her foreslår interviewerne, Kuhnert og Schnell at man kunne betragte det modernistiske begreb transparens således, at det er blevet til transmission. Herzog påpeger til denne ide, at de mange lag i bygningen, de bevægelige og omskiftelige elementer, solcellepaneler, solafskærmning, isolerede glastyper, slører gennemsigtigheden, og skulle efter hans mening indgå i den komplekse form, hvor tingenes overlejring skaber en rigdom af billeder - afspejlende en 'sund fornuft' trods den applikerede karakter.

Christus-Pavillon til EXPO 2000 i Hannover af arkitekterne von Gerkan, Marg + Partner. Fordelingsgange omkring pavillonen bestående af kvadratiske dobbelte glaspartier indeholder objekter der er analoge med udstillingens overordnede tema 'Menneske, Natur og Teknik'. Komponenterne og deres indbyrdes sammenstillinger udgør en 'fortælling' om mennesket og dets forhold til naturen og kulturen, gennem udstilling af objekter knyttet til dette. Samtidig er rummet tegnet af effektfulde spil mellem de translucente flader og materialernes strukturer og stofligheder. Endelig opleves translucensen og filtreringen af omgivelser og lys som en tvetydig afgrænsning af rummet, det nære, det hellige, udstillingen og hele EXPO.



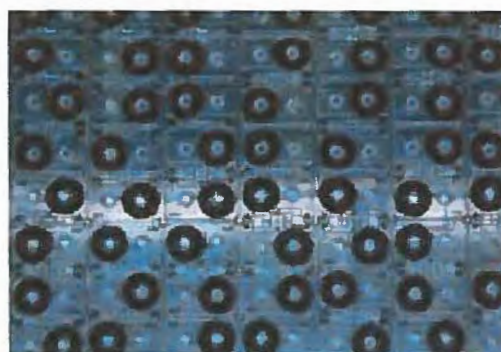
(68)



(69)



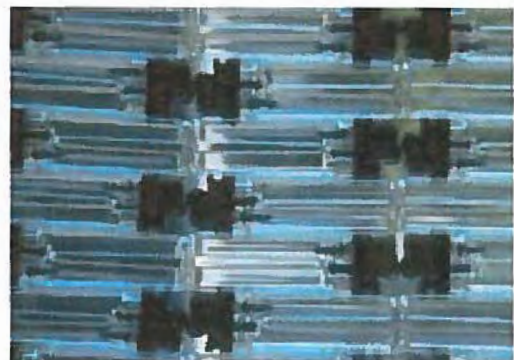
(70)



(71)



(72)



(73)



(74)



(75)



(76)



(77)

66. *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 60, *Galeria Helga de Alvear, Madrid*.

67. *Arte y arquitectura: nuevas afinidades*, Julia Schulz-Dornburg, GG 2000, p. 57, *Margherita Spiluttini*.

68-77. *Ellen Kathrine Hansen*

4.4 Projektbeskrivelsen

'Transparens -lys, energi og arkitektur'

Projektet i forbindelse med denne publikation 'SOLcelle og SOLlys – et arkitektonisk potentiale' danner grundlag for nærværende projektbeskrivelse, der således har den primære hensigt at uddybe og videreudvikle det arkitektoniske potentiale i solceller.

Nærværende projekt har til formål at udvikle en arkitektfaglig metode til at indgå i tværfaglige parallelle produktudviklingsforløb. Metoden skal bidrage til at grupper på tværs af faggrænser kan sætte arkitektoniske værdier på lige fod med kvalitetsmål for ydelse og pris, således at æstetiske, funktionelle, økonomiske og tekniske forhold kan vægtes.

Erfaret fra forprojektet må værdierne defineres ud fra en arkitekturteoretisk tilgang gennem begrebet samt gennem de tekniske analyser af spektral selektivitet i glas og solcellen. Disse tilgange forløber parallelt med produktudviklingen af PEC cellen, som indgår som case. I processen udvikles disse parallelle forløb til en metode til at definere de potentialer der ligger i at det energiproducerende element som solcellekomponenter kommer til udtryk i arkitekturen.

Projektet er bygget op omkring tre parallelle forløb:

Det arkitekturteoretiske, der med udgangspunkt i begrebet 'transparens' belyser begreberne materiale-, forståelses- og perceptionel transparens i relation til de arkitektoniske værdier.

Det tekniske, der analyserer byggekomponenterne PEC cellen og glas ud fra kemiske og fysiske egenskaber.

Casen, en produktudvikling af PEC cellen, hvor fokus på pris og ydelse sammenholdes med de arkitektoniske kvaliteter.

Forløbene forventes at gennemført samtidigt og med en stor grad af vekselvirkning, så de gensidigt kan inspirere og styrke hinanden, ud fra en betragtning om at næste generations solceller skal udvikles som et produkt af både ressourcebevidsthed, teknologisk raffinering og arkitektonisk kvalitet.

De parallelle forløb skal belyse potentialer og problemer i sammenstillingen af de forskellige indgangsvinkler. Erfaringerne skal skærpe udviklingen af en metode der optimerer de parallelle produktudviklingsforløb ved at definere og vurdere disse forskellige kvaliteter ved en solcelle i en fælles ramme.



Facaden på den nye administrationsbygning til Palais des Beaux-Arts i Lille, Frankrig bygger på translucente kvaliteter i klimaskærmen. (78)



Arkitekterne Jean-Marc Ibos og Myrto Vitart fra Paris har skabt en bygning der indgår i en spændende dualitet med den klassiske museumsbygning, der spejles i nybygningen. (79)



Bassinet foran bygningen giver lyset frit spil for spejlinger og refleksioner mellem facade og vandoverflade. (80)



Facaden er bygget op som en termorude. Det yderste glas har en spejlende karakter, på indersiden af dette er der trykt firkantede sølv mønstre, som filtrerer lyset og skaber spil mellem lys og skygge. Trykket er for effekt, samme effekt kunne opnås med solceller. (87)

Uddybning af de tre forløb:

Transparens, en arkitektonisk tilgang

Den teoretiske ramme for definering af værdiparametrene hentes gennem studier af begrebet 'Transparens'. Den primære kilde er Colin Rowe og Robert Slutzkys artikler Transparency I og Transparency II. Begrebet forsøges herudover sat ind i en aktuell sammenhæng gennem belysning af begrebet brugt i tidens malerkunst, installationer, modebranche og arkitektur.

Materiale transparens definerer den gennemskinnelige karakter i materialer, her glasset og solcellerne. Dette betydningslag i begrebet afdækkes og illustreres bl.a. gennem referencer fra kunstinstallationer og naturen, hvor materialer og lys skaber de kvaliteter der ønskes belyst. Efterhånden som projektet skrider frem vil indsigt i PEC cellens og glassets transparente muligheder kunne inddrages for en yderligere indkredsning af disse værdier.

Forståelses transparens definerer det gennemskuelige, som læsningen af betydningslaget i solcelleelementet. Dette beskrives gennem referencer hvor betydningslaget er illustreret.

Perceptionel transparens definerer det fænomen at rumligheder og materialer overlapper hinanden og at dette kan have optiske kvaliteter. Fænomenet belyses gennem referencer fra arkitekturen og kunstens verden, klimaskærmens opløsning og de mange lag samt gennem PEC cellen og dens optiske muligheder.

Byggekomponenter, en teknisk tilgang

Den tekniske tilgang danner grundlag for definering af byggekomponenternes egenskaber. Metoderne og sproget hentes fra den kemiske og fysiske terminologi (som den spektrale selektivitet, udvælgelse af lysets bølgelængder, og de kemiske molekylære strukturer).

Glassets egenskaber kortlægges gennem den kemiske konstruktion og den spektrale selektivitet, glasset og dets kompositmaterialer kan frembringe. Den spektrale selektivitet defineres efter selektion af stråler til lys, varme og el. Her inddrages eksempler på klimaskærme, der indeholder disse kvaliteter.

Solcellen PEC cellens komponenter, deres indbyrdes forhold og påvirkning af ydelse, holdbarhed, pris og arkitektonisk udtryk defineres. Herudover anskueliggøres de produktionstekniske forhold.

Dette justeres løbende med udviklingen af PEC cellen. Endelig fotoregistreres prøver på PEC celler.

Udviklingen af PEC cellen, en case

Værdisætningerne fra den teoretiske og den tekniske tilgang kan her vægtes, konkretiseres og afprøves som ønsker og krav, der bliver integreret i cellens udviklingsprogram. Netop PEC cellen valgt, fordi rammerne indenfor hvilke de ønskede arkitektoniske kvaliteter kan varieres er relativt vide for PEC cellen.

Udviklingen af PEC cellen er et igangværende forskningsprojekt med PEC cellen på Teknologisk Institut. Arbejdet bygger på tekniske forsøg omkring cellens ydelse, holdbarhed, variationsmuligheder og produktionstilpasninger. Dette arbejde leverer parametre for PEC cellens delelementer, og definerer tidsplanen i projektet. Anden fase i udviklingsarbejdet er forsøg, hvor PEC cellen indgår som en komponent i klimaskærmen, den afprøves på produktionsapparat, økonomi, teknik, funktion og æstetik gennem en produktudvikling og et demonstrationsbyggeri. Aktiviteten afhænger af projektets resultater, producenter og bygherre. Det er derfor usikkert, om denne aktivitet kan realiseres inden for projektets tidsplan.

Bygningstyper til programmering

I forløbet formuleres et arkitektoniske program, der definerer PEC cellens æstetiske og funktionelle potentialer og krav. Der opstilles fire bygningstyper med forskellige krav til æstetik og funktion.

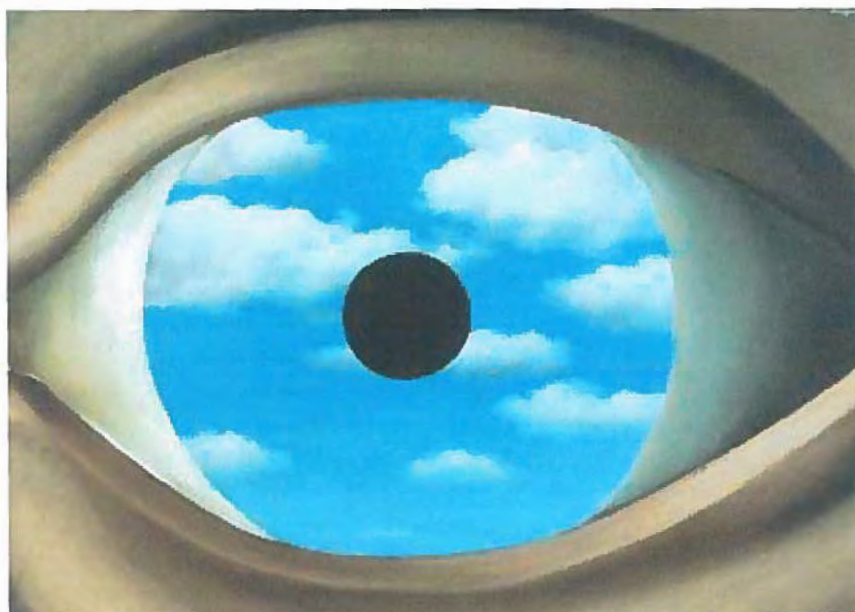
De fire bygningstyper og deres individuelle behov:

- *en kontorbygning* - optimalt arbejdsmiljø, godt arbejdslys, behageligt klima, udsyn, fleksibilitet, kontormoduler, kommercielt facade udtryk
- *en bolig* - mulighed for individuel variation og præg på elementets udtryk, flerfunktionalitet
- *et atrium* - uopvarmet klimazone, semioffentligt rum, store flader, mulighed for ekspressivitet
- *et væskthuis*, eksempel på en industribygning, - 2 x 'fotosyntese', monteres i drivhusprofiler

Til hver type formuleres et program i form af en behovsanalyse for de klimatiske, belysningsmæssige samt de æstetiske intentioner. Herudover defineres de enkelte typers krav til PEC cellen som facadekomponent. Programmerne formuleres med udgangspunkt i erfaringer fra de øvrige værdisætninger.

Miljørigtig Produktudvikling

Metoden 'Miljørigtig Projektering' udvikles til 'Miljørigtig Produktudvikling' der i produktudviklingsforløbet systematisk kortlægger en miljøplan, et miljøprogram og en status af forløbet. Miljøbelastningen vurderes hovedsageligt ud fra driften. Den miljørigtige produktudvikling udføres på en eller flere af de fire opstillede typer. Se afsnit 4.5



Magritte 'The False Mirror', 1928, MOMA, NY, USA. (82)

Goethe: 'Dersom øjet ikke var soleagtigt kunne det aldrig skue lyset'.

(78) *Intelligente Glasfassaden*, Andrea Compagno, Birkhäuser 1999, p. 70, Georges Fessy, Paris
(79) (80) (81) *Glass Construction Manual*, Schittich, Staib, Balkow, Schuler & Sobek, Birkhäuser 1999,
p. 287 + 288, Fessy, Georges, Paris.
(82) Magritte, 'The False Mirror' 1928, MOMA NY

4.5 Miljørigtig komponentudvikling af PEC-cellen

Miljørigtig projektering

Miljørigtig projektering er en metode til at mindske miljøpåvirkninger fra bygge- og anlægsprojekter gennem indarbejdelse af miljøhensyn allerede i projekteringen. Miljøhensynene bygger på en helhedsmæssig betragtning, hvor byggeprojektets miljøpåvirkninger vurderes over hele projektets levetid - fra opførelse og brug til nedrivning. Mange af kravene er endnu ikke indeholdt i lovgivningen, men der er ingen tvivl om at nye lovgivninger samt bygherrer og brugeres fokus på miljømæssige kvaliteter vil fokusere mere og mere på miljøhensyn omfattende råstofudvinding, byggevarefremstilling, udformning, opførelse, drift, vedligeholdelse samt nedrivning.

Formål

Byggeriet består i stigende grad af færdigproducerede teknologiske byggekomponenter, der udvikles i tværfaglige videnskabelige udviklingsmiljøer. Derfor er der i høj grad brug for et redskab til afvejning af de forskellige miljømæssige påvirkninger i produktudviklingen af teknologiske byggekomponenter.

I dette projekt udvikles metoden i 'Miljørigtig projektering' til at kunne indgå i et produktudviklingsforløb som en 'Miljørigtig komponentudvikling'. Metoden skal være en systematisk kortlægning af miljøplan, miljøprogram og status samt en systematisk dokumentation af forløbet gennem prioriteringer, opfølgninger, revisioner og ajourføringer. Formålet er at dokumentere, at der løbende gennem komponentudviklingen har været en bæredygtig omtanke, og at der via processen sikres en løbende forbedring.

Resumé af publikationen 'SOLcelle og SOL lys'

Projektet formuleres til at indgå i ét af de tre forløb i forskningsprojektet 'TRANSPARENS lys, energi og arkitektur', hvor den metodiske tilgang bygger på tre parallelle udviklingsforløb; en teoretisk, en teknisk og en produktudvikling af PEC cellen. Den 'Miljørigtige komponentudvikling' indgår i produktudviklingsforløbet.

Problemstillingen

Solceller er et produkt der er udviklet til rumindustrien og senere forsøgt applikeret til vores huse. Produktet illustrerer tydeligt problemerne i en manglende helhedsorienteret integration, såvel på et arkitektonisk som på et bæredygtigt plan. Eksempelvis vurderes solceller udelukkende på deres 'tilbagebetalingstid', der er regnet ud fra hvor meget elektricitet de producerer og hvad et anlæg koster. Hovedparten af solcellepaneler har standardstørrelser, som ingen kan forklare, og panelerne monteres direkte på tagflader, hvor montør skal ligge med armen inde under panelet og bolte dem fast ét efter ét.

Tidligere var glasset i vores vinduer mindre og lysindfaldet blev derved brudt af opsporsninger. Samtidig arbejdede man med dybe facader, der gav en blødere refleksion af lyset. Med nutidens teknologi er det blevet muligt at fremstille glasfacader, der består af store åbne glaspartier. Glasfacader mod syd skaber ofte problemer med overophedning og for stærkt lysindfald. Derfor er der et reelt behov for at udvikle facadeelementer der tilgodeser behov som tilstrækkeligt med udkgig og indkgig, god fordeling af og optimering af lysindtag, kombination af direkte og indirekte lys samt passiv opvarmning og begrænsning af varmeindstråling.

Emnebeskrivelse

Solcellens orientering mod solen kan og bør konverteres til et bæredygtigt og arkitektonisk potentiale. Ved at lade solens stråler trænge imellem solcellerne eller igennem mere eller mindre translucente celler opstår et lysindtag, der tegner solens bevægelser og foranderlighed. Samtidig kan man 'læse' den energioverførsel af solens lys, der sker som lysets brydning gennem træernes blade.

Solcellen skal integreres i klimaskærmen til et aktivt komponent, som leverer dagslys, passiv solvarme, udsigt, elektricitet og samtidig med mulighed for at dette udspilles gennem en læsbar arkitektonisk iscenesættelse. Det er disse egenskaber 'indeklime', 'energi' og 'synlighed' der skal fastlægges og belyses. Herudover bliver miljøtemaet 'materialer' en parameter for at dokumentere de respektive valg af materialer i komponenten.

Solcellen udgør en forureningsfri energikilde, hvorfor den også kan placeres i bytætte arealer.

Ved en bæredygtig helhedsbetragtning kan solcellens 'tilbagebetalingstid', ud over elproduktionen, gøres op i en bredere sammenhæng, baseret på besparelser i drift og materialer til komponenten i klimaskærmen. Herved inddrages bygherrens visioner, brugerens behov og ønsker samt diskussionen om totaløkonomi, tilbagebetalingstider, anlæg og drift.

Siliciumbaserede solceller

De konventionelle solceller består af grundstoffet silicium, hvilket i rensat form kan monteres på forskellige materialer, herunder glas. Siliciumcellerne er i 1950'erne udviklet til rumfartsindustrien for senere at overgå til byggeindustrien.

Produktionsapparatet er dyrt og ufleksibelt, herudover er højtrent silicium et kostbart materiale. I de senere år har forskningen koncentreret sig omkring de nye typer tyndfilmceller, herunder PEC cellen.

PEC cellen

Den elektrokemiske solcelle, PEC cellen, har været genstand for øget fokus indenfor universitets- og forskningsmiljøer de sidste 5-10 år. Cellens potentialer er at den er billig at fremstille og har en acceptabel virkningsgrad. Et andet vigtigt aspekt er at fremstillingsprocessen for PEC cellen, er væsentlig mere fleksibel med hensyn til produktionstilpasninger og små serier. PEC cellen består af et farvepigment og et hvidt pigment, der er forseglet mellem to glasplader. Solcellen udgør i sig selv en komponent, der åbner for et utal af muligheder for at styre lysindfald, varmestråling, fordeling af lys og udsyn/indkig.

Derfor kan solcellen udvikles til at indeholde klimaregulering og funktionelle som æstetiske parametre. På Teknologisk Institut udvikles en PEC celle der er planteret i deres specielt udviklede vakuumsrudd, hvilket sikrer en god U-værdi i bygningskomponenten.

Bygningstyper

Da PEC cellen i sig selv udgør en bygningskomponent, vil det være fordelagtigt at tænke udviklingen af denne komponent i flere udgaver, der er egnede til forskellige bygningstyper. Typene kræver individuelle modulstørrelser, arkitektoniske udtryk samt funktionelle og klimatiske forhold.

Komponenten integreres i den sydvendte facade i såvel nybygning som renovering. Bygningstyperne behandles i nævnte rækkefølge og har overordnet følgende krav:

- *en kontorbygning* – med udgangspunkt i personalets arbejdsmiljø og arbejdsplads, optimalt arbejdsmiljø, godt arbejdslys, behageligt klima, udsyn, fleksibilitet, kontormoduler, kommercielt facade udtryk, stort basis-elforbrug til apparatur og belysning
- *en bolig* - mulighed for individuel variation og præg på elementets udtryk, flerfunktionalitet, stort energiforbrug til opvarmning
- *et atrium* - uopvarmet klimazone, semi-offentligt rum, store flader, mulighed for ekspressivitet
- *et væksthuse*, eksempel på en industribygning, - 2 x 'fotosyntese', monteres i drivhusprofiler, stort energiforbrug til opvarmning og kunstlys

Energiforbrug, arbejdsmiljø- og indeklima.

Langt den største energibelastning indenfor det totale energiforbrug i livscyklusvurderinger er 'drift'. Arkitekt Arne Hansens illustrerer dette i 'Total livscyklus-energiforbrug for Økohus 99 og referencehuset, levetid 50 år'. Her udgør opvarmning, elforbrug og varmt vand for reference huset ca. 12.000 kWh/år/bolig ud af det totale forbrug på ca. 14.000 kWh/år/bolig. Dvs. ca. 85% af det totale energiforbrug for boligen er drift. Ifølge Arne Hansens 'Miljøprofil for 2 kontorhuse' udgør driften her ca. 73% af det samlede energiforbrug.

De miljømæssige besparelser findes primært ved at tænke elementet optimeret i forhold til driftsudgifter og herved miljøeffekter i form af besparelse af forbrug af energiråstoffer i form af fossile brændsler som olie, kul, gas og atomkraft. Det vil sige at det er en ressourcemæssig besparelse, er et mål om at få et bedre indeklima og derved en bedre sundhed og samtidig en beskyttelse af det ydre miljø gennem besparelse af forbrænding af energiråstoffer for at mindske CO₂ (kuldioxid) udslippet.

CO₂ udslippet (drivhuseffekten) vurderes som den alvorligste miljøbelastning (effekt på det ydre miljø). Brugen af fossile brændstoffer til drift har en stor andel i CO₂ udslippet. Derfor er der i denne opgave prioriteret at vurdere miljøbelastningen hovedsageligt ud fra driften.

De fysiske forhold for indeklima omfatter de termiske forhold (kulde, varme, træk, kuldenedfald), lys samt stråling. Lysforholdene kan give anledning til effekter i arbejdsmiljøet og indeklimaet, både når det er for svagt og når det er for stærkt, og hvis det varierer for meget i styrke. Stråling kan forekomme som stråling fra radioaktive kilder eller som ultraviolet stråling, synligt lys, infrarødt lys, mikrobølger, radiobølger og ultralys.

MILJØPLAN/AKTIVITETSPLAN:

Programfasen, fase 1

1. del af projektet 'TRANSPARENT lys, energi og arkitektur'.

Programmering omkring indeklimatiske behov ud fra en spektral selektivitet af solens energi.
termisk indeklima, passiv varme, undgå overophedning, ventilation
optisk indeklima, lys, arbejdsbelysning og æstetisk belysning, ind- og udkig
elforbrug, elproduktion

Forslagsfasen, fase 2

Iflg. Projektet 'TRANSPARENS lys, energi og arkitektur' den 2. del af forløbet

Programmeringen omkring behov i indeklima vægtes med udviklingsprogrammets parametre for pris, holdbarhed og ydelse. De fire cases (bygningstyper) opstilles. Til brug for indeklimatiske målinger og beregninger bruges opfølgninger på bæredygtige byggerier med indeklima som tema. SolEnergi Center Danmark har en del af disse opfølgninger i gang.

En evt. 2. fase i udviklingsprogrammet for PEC cellen inddrages, 'retnings bestemt selektivitet af solens stråler'. Denne parameter vil have indflydelse på den spektrale selektivitet.

Projektfasen, udvikling af byggekomponent, fase 3

Iflg. Projektet 'TRANSPARENS lys, energi og arkitektur', den sidste 1/3 del af forløbet

Miljøkortlægningen konkretiseres og miljøtiltag indarbejdes overfor producent og produktionsapparat

Faser uden for projektforsløbet:

Demonstrationsbyggeri (fase 4), med opfølgende energiberegninger.

Driftsfasen (fase 5), hvor miljøvejledninger indarbejdes i drift- og vedligeholdelsesmanualerne

Prioriteret område/emne	Miljøpåvirkning	Miljømål	Virkemiddel	Prioritering og fase
Energiforbrug i driftsfasen	Kan mindske forbrug af fossile brændsler som olie, kul, gas og atomkraft. Dvs. både bedre indeklimateforhold og sundhed og samtidig mindre CO2 udslip.	En klimaskærm der optimerer de indeklimatiske forhold med udgangspunkt i det omgivende klima.	Gennem definering af behov og hvordan disse kan tilgodeses gennem den spektrale selektivitet af solens stråler gennem komponenten	Høj prioritering Fase 1 (programmering) Fase 2 (vægtning og konkretisering af værdier) Fase 3 (produktionsapparat indarbejdes)*
Opvarmning Kulde, varme og træk	Mindre forbrug af brændsler der forårsager CO2 udslip	Optimering af passiv opvarmning gennem komponenten, undgå overophedning og kuldene-fald og derved besparelse i såvel opvarmning som ventilation Energiberegning for besparelse i el ved optimal dagslysstyring defineres.	Behov defineres gennem den spektrale selektivitet i komponenten. Vakuumsrudens U-værdi optimeres Automatisk styring af temperaturforhold kombineret med individuel regulering. Komponenter udvikles til forskellige klimazoner. Evt. udnyttelse af overskudsvarme. Minimal kølebehov gennem definering af optimalt varmeindtag. God solafskærmning, manuelt betjent.	Høj prioritering Fase 1 Fase 2 Fase 3
Belysning og stråling	Mindre forbrug af brændsler der forårsager CO2 udslip	Optimering af kvantiteten og kvaliteten i dagslysendtag igennem komponenten, derved besparelse i kunstbelysning. Energiberegning for besparelse i opvarmning og køling defineres.	Behov defineres gennem den spektrale selektivitet i komponenten. Effektiv udnyttelse af dagslyset gennem kombineret transparent og translucent glas. Styring af den generelle-såvel som særbelysningen efter dagslysf forhold. Ventilation berøres sekundært.	Høj prioritering Fase 1 Fase 2 Fase 3
Elproduktion PEC-cellen	Mindre forbrug af brændsler der forårsager CO2 udslip	Optimering af PEC-cellens ydelse og holdbarhed i forhold til pris. Egenproduktion af el defineres i forhold til besparelse.	Cellens ydelse optimeres gennem forholdet mellem farvepigment og TiO ₂ , cellens areal og cellens placering. Herudover synliggørelse af egenproduktion og forbrug	Høj prioritering Fase 1 Fase 2 Fase 3

Prioriteret område/emne	Miljøpåvirkning	Miljømål	Virkemiddel	Prioritering og fase
Brugerkomfort og indeklima Synlighed/ Optisk indeklima		Brugernes opmærksomhed på den energiproducerende facade skal lede til forståelse til vores forhold til forbrug og klima, den større sammenhæng. Derved motivation for at ændre adfærd omkr. Forbrug.	Komponenten skal gennem helhedsorienteret udvikling udtrykke en æstetik der bygger på læsningen af de mange klimaregulerende og miljømæssige parametre. Disse æstetiske kvaliteter defineres og illustreres tidligt i produktudviklingen.	Høj prioritering Fase 1 Fase 2 Fase 3
Arbejds miljø/ Funktionelt indeklima		Komponenten skal udvikles til forskellige bygningstyper og behov.	Behov defineres og integreres allerede fra komponentens udviklings fase 1.	Høj prioritering Fase 1 Fase 2 Fase 3
Råstofindvinding Og forarbejdning af råmaterialer	Siliciumceller fremstilles af højrent silicium, hvilket kræver høje temperaturer, produktionsbindinger og decentralisering. PEC-cellen kræver ingen silicium og simple produktionsapparat	Valg af miljøvenlige bestanddele i PEC-cellen ud fra livscyklusvurdering.	PEC-cellens bestanddele og deres forarbejdning defineres og ud fra livscyklusvurderinger. PEC-cellens miljøpåvirkninger vurderes i forhold til den traditionelle siliciumcelle.	Fase 1
Fremstilling af byggevarer		Energiforbrug i fremstillingen skal minimeres. Produktionsapparatet skal være fleksibelt. Produktionen skal kunne placeres decentralt for minimal transport og klimatilpasninger.	Processen for fremstilling af PEC-cellen vurderes, herunder fremstilling af vakuumruden. Produktionsapparatet vurderes ud fra fleksibilitet og decentralisering.	Fase 2 og 3
Udførelse og ændringer		Komponenten skal i høj grad være fleksibel, monteringsvenlig og minimal transport	Enkle variationstilpassede produktionsapparater. Modulstørrelse, rammer og monteringsløsninger skal være monteringsvenlige og fleksible for ændringer.	Fase 2 Fase 3
Nedrivning og bortskaffelse			Det undersøges om komponenten kan skilles ad og de enkelte bestanddele, især glasset kan genanvendes. Om der forekommer miljøbelastende bestanddele i komponenten.	Fase 2 Fase 3

4.6 Litteratur

- An Age of Glass, Baker, T.C.Pilkington, Th Illustrated History, London 1994
- Arte y arquitectura: nuevas afinidades, Julia schulz-Dornburf, Editorial Gustava Gili, SA, Barcelona, 2000
- Glass Construction Manual, Schittich, Stab, Balkow, Schuler, Sobek, Birkhäuser 1999
- Glass in Architecture, Michael Wigginton, Phaidon 1996
- Håndbog i Miljørigtig Projektering, BPS 121
- Intelligente Glasfassaden, Andrea Compagno, Birkhäuser 1999
- PBS 121 Håndbog i Miljørigtig Projektering
- Transparency, Colin Rowe/Robert Slutzky, Birkhäuser
- SOL Power, The Evolution in Solar Architecture, Behling, Sophia & Stefan, Prestel 1996

