LUND UNIVERSITY

Flervetenskaplig ljusforskning

Karlsson, Reine; Laike, Thorbjörn; Samuelson, Lars; Arfvidsson, Jesper; Dubois, Marie-Claude; Johnsson, Per; Nilsson, Dan-E; Nilsson, Elisabeth; Persson, Johannes; Sjöberg, Klas; Ståhl, Lars-Henrik; Widell, Susanne

2011

Link to publication

Citation for published version (APA):
Karlsson, R., Laike, T., Samuelson, L., Arfvidsson, J., Dubois, M.-C., Johnsson, P., Nilsson, D.-E., Nilsson, E., Persson, J., Sjöberg, K., Ståhl, L.-H., & Widell, S. (2011). *Flervetenskaplig ljusforskning.* (Pufendorf Institute Report Series). Pufendorfinstitutet, Lunds universitet.

Total number of authors:
12

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Download date: 18. Oct. 2026

PUFENDORF INSTITUTE
FOR ADVANCED STUDIES

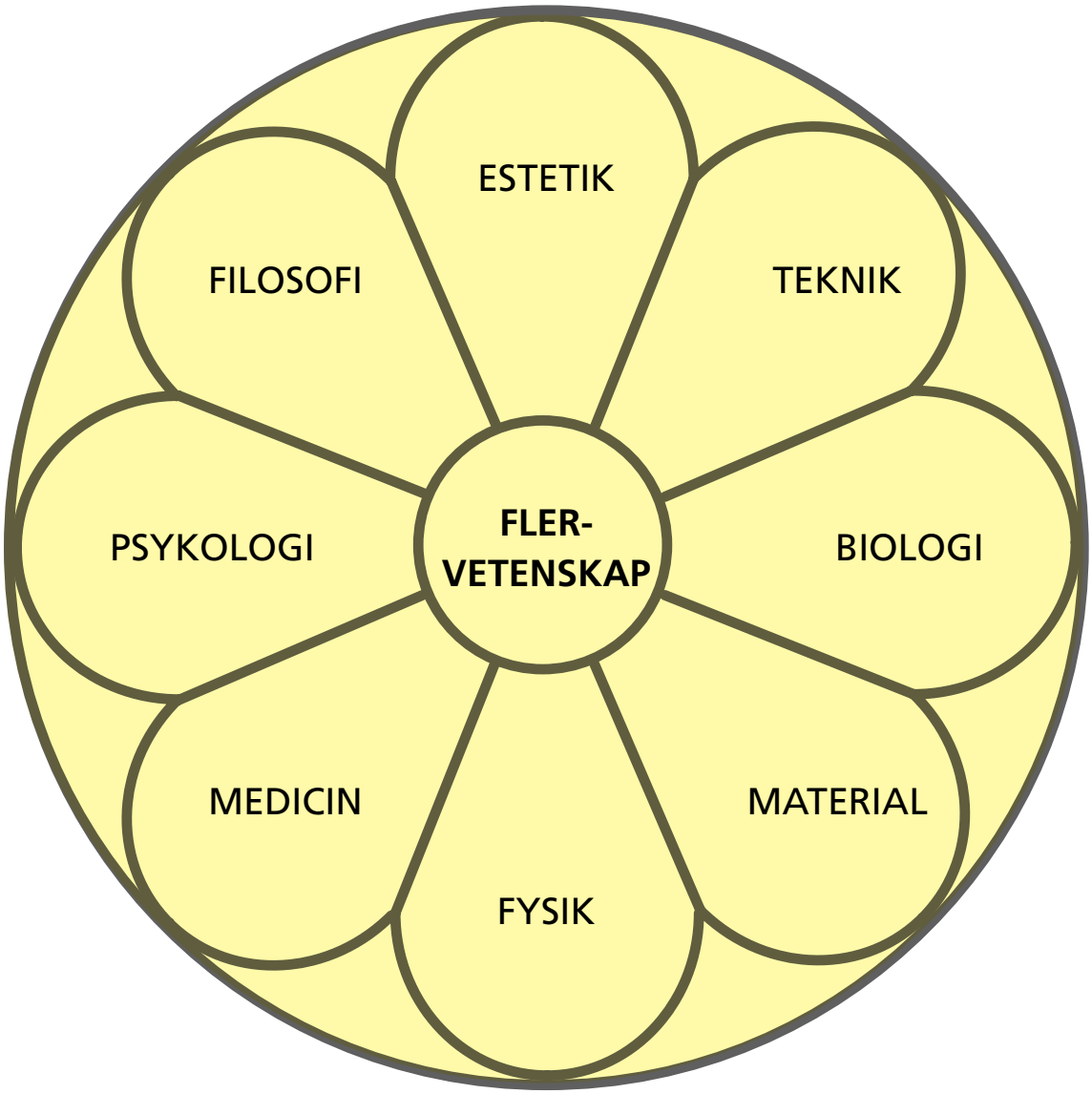
Fler-vetenskaplig ljusforskning

PUFENDORF INSTITUTE
REPORT SERIES NO 1

Begreppsbildning och ämnesområden för

Flervetenskaplig ljusforskning

Funktionellt ljus för hälsa och välbefinnande



PUFENDORF INSTITUTE
FOR ADVANCED STUDIES

Reine Karlsson, Thorbjörn Laike, Lars Samuelson
Pufendorf Institute for Advanced Studies, Lunds universitet

ISBN 978-91-7473-064-7
Omslag & layout: Magnus Gudmundsson, Bengt Pettersson, Eva Persson
Omslagsbild: Lars-Henrik Ståhl
Tryck: Media-Tryck 2011

BEGREPPSBILDNING OCH ÄMNESOMRÅDEN FÖR FLERVETENSKAPLIG LJUSFORSKNING

Akademisk forskning för näringslivsutveckling för funktionell energieffektiv belysning som befrämjar hälsa och välbefinnande

Reine Karlsson, TEM

Thorbjörn Laike, Miljöpsykologi

Lars Samuelson, Fasta tillståndets fysik

Jesper Arfvidsson, Byggnadsfysik

Marie-Claude Dubois, Energi och byggnadsdesign

Per Johnsson, Psykologi

Dan-E Nilsson, Synvetenskap

Elisabeth Nilsson, Teknisk Nanovetenskap

Johannes Persson, Teoretisk filosofi

Klas Sjöberg, Medicin

Lars-Henrik Ståhl, Formlära

Susanne Widell, Växtbiologi

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning 4

Förord 7

Sammanfattning 8

Executive summary 9

Bakgrund 14
- Bakgrund affärsutvecklingsmöjlighet 14
- Skriftens innehåll 15

1.Vad är ljus? 16
- Ljus som fysikaliskt fenomen 16
- Källor till ljus 17
- Vad är färg? 18

2. Ljus, energi, resursförsörjning och miljö 20
- Det elektriska ljusets historia 22

3. Begreppsbildning 23
- Begreppsbildning som bas för tvärvetenskap 23
- Utmaningarna med tvärvetenskap 24
- Tvärvetenskap ur ett filosofiskt perspektiv 24
- Ljuskvalitet 26
  - Mer och större är inte alltid bättre 26
  - Utmaningen i att satsa på nytänkande 26
- Systemtänkande och begreppsbildning för förnyelse 28
- Sambandet med forskning inom traditionella ämnesområden 29

4. Ljusforskning ur ett fysikaliskt perspektiv 31
- Att skapa ljus 31
- Att styra och manipulera ljus 31
- Ljusets funktionella växelverkan 32

5. Ljus ur ett biologiskt perspektiv 33
Växter och ljus 33
Växternas fotosyntes 33
Fotoreceptorer som signalförmedlare 34
Växtodling med artificiellt ljus 34
Kompetensen i Lund och samhällsnyttan 35
Lund har kunskap om LED-baserad belysning för växtodling 35
Människors och djurs synsinne 36
Synsinnet är en produkt av biologisk evolution 36
Biologisk synforskning i Lund 36
Närsynthet och blått ljus 37
Nattseende 37
Djurens färgseende 37
Navigation med hjälp av syn 38
Ljusmiljöns betydelse 38
Biomimetik 38

6. Ljus som medicinskt fenomen 39
Frågeställning och metodik 39
Bakgrund 39
Direkta ljuseffekter 39
D-vitamin 40
Hud- och ögonsjukdomar 40
Indirekta ljuseffekter via 3e receptorn 40
Endokrina och immunologiska reglersystem/autoimmunitet 40
Hjärtkärlsjukdomar- dygn och årstid 41
Centrala nervsystemet 42
Forskning i Lund 42
Slutsatser 43

7. Ljus som psykologiskt fenomen 44
Psykologisk kompetens i Lund 46
Miljöpsykologi 47

8. Ljus som estetiskt fenomen 48
Några ord om estetik 48
Ljusets estetik 48
Det urbana ljuset 50
Ljusskeptiker 50

9. Teknik 52
LED 52
LED- Kompetensen i Lund och samhällsnyttan 55
Optik och värme 56
Industridesign, elsystem och ljusstyrning 57
Dagsljus och arkitektur 59
Byggnaden som system 60
Effektiv elanvändning och arbetsmiljö 61
Hållbar introduktion av ny teknik 62

10. Slutsats 63

Litteratur och referenser 64
Övrig Litteratur 67
Tvärvetenskap 67
Växtbiologi 67
Medicin 67
Miljöpsykologi 67
Psykologi 67
Estetik 68
Fysik 68
Teknik och teknikutveckling 68

Förord

Ljus och utveckling av belysningsteknik har blivit högaktuellt de senaste åren. Ljusfrågorna knyter an till flera olika vetenskapliga områden. Det är därför en frågeställning som passar för Lunds universitet, (LU) som har en stor bredd av ämnesområden och korta avstånd mellan institutionerna. För att kunna ta nytta av denna form av utvecklingsmöjligheter har LU en stödfunktion för uppstart av avancerade flervetenskapliga initiativ, Pufendorfinstitutet.
Ett kompetenscentrum för ljus kan initiera ljusrelaterade forskningsprojekt och tydliggöra varför och på vilka sätt flervetenskaplig kunskap är viktig för en hållbar samhällsutveckling. Målgruppen för den föreliggande skriften är alla de olika intressenter som på något sätt kan tänka sig medverka i, samspela med och ta nytta av en centrumbildning för ljuskunskap.

En grundval för det här initiativet är att vid LU finns avancerad materialforskning med koppling till innovativa företag som utvecklar avancerad lysdiodteknik. En annan grund är att Energimyndigheten sedan tre år finansierar ett forskningsprogram om Energieffektiv belysning och att man för två år sedan startade Centrum för energieffektiv belysning, CEEBEL som har sitt säte vid LU. Placeringen grundar sig på att man där i trettio år arbetat med miljöpsykologisk forskning kring ljus.

Första steget i processen som ledde fram till denna skrift var att vi, tillsammans med Bo Pedersen GLO AB, Per Johnsson psykologi och Klas Sjöberg medicin, i februari 2010 lämnade in en intresseanmälan till Pufendorfinstitutet. Vi fick positiv respons för ett inledande seminarium och den flervetenskapliga dialogen har sedan rönt allt större intresse. Initiativet har vid olika tillfällen presenterats för rektor, vicerektorer och dekanerna vid LU.

Före sommaren 2010 inleddes arbetet med föreliggande flervetenskapliga skrift. Grundversionerna av textens ämnesspecifika delar har skrivits av experter inom respektive ämnesområde. Skriften har sammanställts av Reine Karlsson baserat på dialog med författarna. Denna har främst förts under sommaren och kring den tidigare arbetsversionen 2010-08-16.

Syftet med skriften är att beskriva den flervetenskapliga ljusrelaterade kompetensen i Lund. Avsikten är att skapa en gemensam plattform för ett flervetenskapligt Kompetenscentrum för ljus. Tanken är att stärka basen för de deltagande ämnesområdenas kontakter med olika partners, svenska och europeiska utvecklingsaktörer och finansiärer.

Föreliggande rapport är en produkt från Pufendorfinstitutets *Advaced Study Group* för ljus. Ett hjärtligt tack till Pufendorfinstitutet, i synnerhet Sture Forsén och Sune Sunesson, för alla goda råd och uppmuntran.

Lund 2010-11-15

Thorbjörn Laike Reine Karlsson Lars Samuelson

Edison uppfann inte glödlampan, men han skapade en innovationsprocess som gjorde att man började ta nytta av elektriskt glödljus.

Edisongänga

Sammanfattning

Ljusets energi och information är grundläggande för de fotokemiska reaktioner och sinnesintryck som möjliggör alla former av liv. Ljusgruppens arbete visar att det, under de senaste decennierna och i synnerhet de senast åren, har vuxit fram ny väsentlig kunskap om hur människans livsmöjlighet påverkas av ljus och oljus.

Utöver funktionellt ljus vet vi idag att de ickevisuella effekterna är väsentliga både medicinskt och psykologiskt. Väsentliga delar av denna nya kunskap har ännu ej nått fram till tillämpning inom belysningsbranschen. Det växer nu fram tekniska möjligheter att skapa ett situationsanpassat och dynamiskt ljus på allt mer förfinade sätt, t.ex. med lysdioder.

De globala affärsmöjligheterna och EU-regleringen för att fasa ut de konventionella glödlamporna gör att förändringstrycket inom belysningsbranschen är hårt. Framtidsinriktade företag intresserar sig allt mer för ljusrelaterad teknikutveckling. Det finns starka skäl för en snabb introduktion av den nya tekniken, för att spara energi i samklang med att skapa en mer attraktiv belysning. Samtidigt finns det risk att allt för hastig introduktion av ljuskällor leder till en negativ uppfattning om den nya tekniken. Det finns också risk att en utbredd användning av nya ovanliga material, t.ex. i dioder, elektronik och flamskyddsmedel, leder till oförutsedda miljökonsekvenser och hälsorisker.

Syftet med skriften är att ge en flervetenskaplig översikt av behovet av ljusrelaterad kompetensutveckling och att kort beskriva Lunds universitets ljuskompetenser inom fysik, biologi, medicin, psykologi, estetik och teknik. Avsikten är att ge underlag för gränsöverskridande dialog och kontakter mellan olika former av intressenter. Det finns en bra grund för flervetenskapliga satsningar genom att Lunds universitet har stor ämnesmässig bredd och att det är korta avstånd mellan institutionerna.

Eftersom belysningssektorn befinner sig i en förändringsfas är det viktigt att utveckla ljusbegreppen som dynamiska verktyg för ömsesidig förståelse. För att åstadkomma en hållbar utveckling är det viktigt att satsa på en gemensam begreppsbildning som efter hand förbättrar möjligheterna för meningsfull gränsöverskridande dialog. För att kunna genomföra detta krävs det en organisation som kan koordinera, bevaka gemensamma intressen, ta ansvar för gemensamma aktiviteter och skapa en bred medvetenhet om ljusfrågornas betydelse. Vidare måste verksamheten ha en mötesplats för dialog och gemensamt arbete.

Ambitionen är att förbättra förutsättningarna för att var och en skall kunna ta upp ljusrelaterade frågor med utgångspunkt från sitt eget ämnesområde. Målet är att verka för funktionell energieffektiv belysning som befrämjar hälsa och välbefinnande.

> … Martin älskade dessa gröna lampor, som icke hettade och icke luktade illa och vilkas ljus hade ädelstenens rena och kalla glans, och han längtade efter den dag, då det elektriska ljuset skulle bli billigt nog att tränga ända ned till de fattigas hem.
>
> *Hjalmar Söderberg (1869-1941), Martin Bircks ungdom*

LIGHTING FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Executive summary

Appropriate lighting is a basic prerequisite for the quality of modern life. The electric light has enabled a great expansion of human activity. However, inappropriate light and light pollution also have serious side-effects on human health and quality of life. Furthermore, the energy and materials used for lighting tend to have serious environmental consequences.

As a species, humans depend most heavily upon visual and endocrine regulatory information to interact with the environment. Some 80% of our sensing cortex in the brain is devoted to vision. All species, including humans, also depend upon the natural, 24-hour light-dark cycle to coordinate, literally, every physiological system in the body to live healthy and productive lives.

Effective lighting is one of the important elements for a sustainable lifestyle. Thus far, most of the interest has focused on the amount of light and the efficiency of the light producing processes, often measured as lumens (lm) and lm/W. The primary aim has been to produce a sufficient amount of light at the lowest possible cost. Most of the consumer interest has focused on the cost of the light source. In a life-cycle perspective the energy cost has become a major part of the cost, in particular for lighting with ordinary incandescent light bulbs. Since the 1960s the professional market has become increasingly interested in more efficient light sources.

The evolving technology, primarily in Light Emitting Diodes (LED), is beginning to enable new tailor-made and dynamic forms of lighting. The commercial LED technology is approaching the same level of efficiency as fluorescent tubes. Incandescent lamps mainly produce heat, fluorescent tubes produce the light in an indirect way and LED produce the light in a direct, and thereby more effective and versatile way. The purchase price for high quality LED-based light sources is still relatively high, but the life-cycle cost is becoming more competitive. There is keen interest in light quality to enhance plant growth within intensive greenhouse production systems.

So far there has not been much public awareness of the importance of the quality of light. Since the 1990s, there have been significant breakthroughs in knowledge about the positive and negative effects of different kinds of light, on human health and comfort. There is also an evolving interest in light pollution, i.e. too much light and unsuitable kinds of light.

On a global level, countries like China and Korea are investing heavily in the development of LED related businesses. Within this context, it is urgent for Sweden to make significant investments in the development and commercialisation of new light related knowledge and advanced lighting systems, with a special emphasis on human lighting needs and greenhouse applications. At present there is a relatively narrow window of opportunity to build on these technological advancements in the con-

text of the policies for the phase out regulation of incandescent light sources.

There are strong reasons for the rapid introduction of new lighting technologies. However there is also a risk that a too rapid introduction of the new technologies may cause disappointment because of poor quality products, which can result in a bad image for the new technologies. There is also a considerable risk that a rapid international introduction of new kinds of lighting systems, that contain numerous unusual materials, some of them toxic, for example in the diodes, electronics and flame retardants, may cause serious unanticipated human health and environmental consequences.

The purpose of the initiative before us is to build upon and expand the present commitment and multidisciplinary capacity within Lund University and other institutions to advance light related knowledge and to accelerate the advanced commercialisation of evolving lighting systems. To enable this it is necessary to build a common conceptual foundation for interdisciplinary dialogue and contact among different kinds of stake-holders. This report describes some light related foundations in a number of different scientific areas; mainly physics, plant and vision related biology, medicine, psychology, aesthetics and technology.

The objective is to promote sustainability oriented uses of light. One obvious aspect is that it is important to reduce the amount of energy that is used for lighting. To make people interested in low energy lighting products, a lighting that is more attractive and cost effective than the presently used light sources must be provided. The cost saving through energy savings is one essential aspect. To make the products truly interesting on the market they should also provide better light.

The key issue to provide appropriate guidance for renewal of the lighting sector is to clarify what good light is, in various situations and for diverse purposes. There is a need to improve and to make better use of light-related knowledge from different sciences through interdisciplinary collaboration and translational research. The primary focus in the suggested translational research is to develop the interplay among research processes, learning processes in society, innovative developments of applications and policy-making. It is important to interpret the societal need for various kinds of light related knowledge and to translate this understanding so that it can be used as guidance for further advancement of various kinds of translational and basic research.

Light from a number of scientific perspectives

The overarching ambition for this initiative is to promote sustainable development. This report focuses on the scientific foundations in a number of basic traditional research areas.

Physics

The physics underlying lighting technologies are, in principle, very well understood, with the traditional incandescent lamps being black-body radiators, with the totally dominating part of the emitted spectrum occurring in the infrared, reducing the efficiency to 5%. The light generation in fluorescent tubes, on the other hand, occurs from impact excitation of atomic species, and now efficiencies reaches up to 20-30 %, albeit to the cost of incorporating heavy metals in the technology. In contrast to these more established lighting technologies, the light-emitting diodes emit “cold light”, occurring from the recombination of electrons and holes across the band-gap in a semiconductor heterostructure, such as quantum wells, and the efficiency of this conversion of electrical to optical energies reaches efficiencies of at least 50%.

Plant biology

Plants and algae use light energy absorbed by chlorophyll in photosynthesis to produce carbohydrates from carbon dioxide and water. Besides this, the information carried by light is used to optimize plant growth and behaviour, to guarantee the best chances of survival and reproduction. Different pigments other than chlorophyll absorb light for

these processes and allow control of e.g., gas exchange, flowering, shade avoidance and production of phytochemicals.

The light emitted from high pressure sodium lamps used traditionally in greenhouses is quite poorly adjusted to what the plants use which results in unnecessarily high energy costs. With LED light in greenhouses, the energy consumption can be drastically lowered, since the spectral distribution can be tailor-made for the plant. Furthermore, light can be varied to stimulate specific processes such as the synthesis of specific plant products important to human health.

Visual science

Vast numbers of animal species rely heavily on vision for their interaction with the environment. The eyes and brains of all these diverse species have evolved to optimally extract visual information from naturally lit environments. Visual science generates knowledge about the eyes, the brains and the visually guided behaviour of all these animals, including humans. In order to understand the conditions at which visual systems have evolved to work, visual science also investigates the properties of natural scenes. Being a product of evolution, the human visual system can be expected to work best in naturally lit conditions, similar to those in which it evolved. By studying the properties of natural visual scenes it is possible to mimic relevant aspects of these conditions in artificial lighting. This is a powerful, yet largely unexplored approach for designing lighting that supports both well-being and productivity. The life and behaviour of in-door livestock, pets and pollinating insects in greenhouses is likewise influenced by artificial lighting, and knowledge about their visual system and natural visual scenes can be exploited for the design of artificial lighting for these animals just as it can for humans.

Medicine

People in industrialized countries spend more than 85% of their time inside buildings. During the latest decades we have learnt that factors such as irregular working hours, sleep deprivation and the season of the year have a vast impact on the risk of developing different kinds of diseases, pointing to a tight association between different biological rhythms and health.

Light is the key factor that regulates and modifies these rhythms. Seasonal affective disorder is an example of a condition directly associated with the amount of light depending on the season of the year. However, several other diseases are also influenced by light both from day to day and from one season to another. For example, in cardiovascular disease, the risk for myocardial infarction is highest in the morning. The risk of developing symptomatic cardiac insufficiency is highest during wintertime. Some diseases are aggravated during spring and fall, such as for example gastritis or development of diabetes. Due to a higher immunologic activity in the morning, patients with rheumatoid arthritis have more symptoms in the morning. Even more intriguing is the fact that not only the amount of light but also the quality of light has an impact on specific aspects of health. In Parkinson patients walking with canes with green light beams improved gait speed and stride length and reduced the number of steps and freezing episodes compared to red light beams.

Many conditions deteriorate especially during cold and dark periods and to some extent it is possible to compensate for lack of sun light by different types of artificial light. From all these respects research on the relation between light (quality and quantity) and different disease manifestations is of critical importance to be able to maintain a good health in our industrialized 24/7 society.

Psychology

From a psychological point of view the human relation to light may be seen from different angles. Firstly, our visual senses are dependent on light. It is important that basic requirements are fulfilled in order to perform well. Insufficient light or lighting that is glaring, or in other ways unpleasant, reduces the possibility to perform in a good way. Secondly,

light helps us to shape our circadian rhythms, to divide between day and night. Lack of light may have an adverse effect on our biological clock and could in the worst case result in severe clinical depressions. A good lighting situation on the other hand is beneficial for individual well-being. Finally, light is important for the experience of any environment. Dull and monotonous light may understimulate the individual and cause psychological imbalance. On the other hand, especially concerning indoor environments, and environments with artificial lighting, the lighting situation may add to the complexity of the environment resulting in psychological overload. One aim of the psychological studies of light and lighting is to find the balance.

Aesthetics

Light is a precondition for all visual impressions, it is also evident to link aesthetical aspects on space, objects, colour, and shape to different studies on light. Paradoxically, this self-evident relation between aesthetics and light has been investigated to a rather low extent. Nevertheless, light-related phenomena have been discussed by several thinkers in the tradition of aesthetics. Roughly, the discussions can be divided into four categories: 1. Physical handlings of light and light effects. 2. Depiction of light. Art or images, where the ambition is to depict something, is also a depiction of light. 3. Light as a metaphor. Here we also have to regard literature, religions or myths. 4. Aesthetical aspects on the design of light, lamps and light sources.

Technology

Today's lighting technologies, based primarily on incandescent lamps or compact fluorescent lamps (CFLs), are both bound to be phased out within 3-6 years from now, due to either unacceptably low efficiency or environmentally unacceptable use of mercury in the CFLs. The introduction of light-emitting diodes (LEDs) as the replacement technology has so far been delayed due to the cost level being too high. As soon as the LED manufacturing technologies make progress by which LED lamp costs will be reduced by a factor 3-5, this will become the totally dominant technology. Interestingly, the research at Lund University has created a high-tech company (GLO AB) with the potential to make this game-changing technology transition, by which the required cost reduction will occur and the dramatic development and transition to the lighting technology of tomorrow will happen.

To enable the build up of ability to make a proper use of LED and other new lighting technologies, it is crucial to prepare for a renewal of the lighting sector. Lighting is starting to be transformed from an unsophisticated commodity with high operating costs into an advanced and much more versatile technology. Electric lighting is one of the major end-uses of energy in modern buildings while windows, which provide daylight, are the most important energy loss/gain surfaces in building envelopes. Daylight is important for human well-being and lighting is thus closely connected to energy, environmental and economic aspects of building design and retrofit.

To enable a transition to new and more effective lighting solutions, there is a need for transformative systems thinking. It is fundamental to develop the knowledge about the user needs and preferences as guidance for development of integrated systems solutions. There is a need to integrate knowledge from design, optics, control systems, solid state physics and electronics and energy supply technologies. Furthermore it is important to facilitate renewal oriented collaboration among the actors in the building sector and the light related business development actors.

Conclusions

During the interdisciplinary light related dialogues it has become apparent that the various subject areas have a number of common foundations, not least that they tend to have a common basis in that the elementary subjects and basic physical proces-

ses are similar. However, there are large differences in the language and the conceptualization.
The ambition of this Pufendorf Advanced Study group includes promotion of multidisciplinary and translational research. One direction is to enhance the light-related societal gain from university knowledge and research processes. The other direction is to enhance the ability to identify societal sustainable development needs for light-related knowledge and to translate such observations into multidisciplinary research and advancements in each of the basic fields of research.

Light is a key factor for our well-being. In order to improve general health and quality of life it is instrumental that we achieve the knowledge needed to be able to construct and build a light related infrastructure for a sustainable societal development.

Bakgrund

En viktig ambition med det föreslagna arbetet är att skapa ett forum för dialog kring ljusrelaterade frågor. Ljusets energi och information är en grundläggande aspekt för alla former av liv. Ljuset är fundamentalt för de fotokemiska reaktioner och sinnesintryck som möjliggör växternas och djurens anpassning till miljön. De visuella intrycken är primära som bas för den kognitiva förmågan att tolka omgivningen, vilket bland annat är en grund för lärande och estetiska upplevelser. De icke-visuella effekterna påverkar också välbefinnandet och hälsan. Ljuset har kopplingar till flertalet vetenskapliga områden och i denna skrift har vi inkluderat beskrivningar av kopplingar till fysik, biologi, zoologi, medicin, psykologi, estetik och teknik.

Ett vetenskapligt ämne som specifikt fokuserar på relationer mellan människa och miljö är miljöpsykologi. I Lund arbetar miljöpsykologi sedan 30 år med ljusets icke-visuella effekter på människor, vilket har flervetenskapliga kopplingar till psykologi, medicin och arkitektur.

Bakgrunden till behovet av en flervetenskaplig satsning på ljus är således att:

Det växer fram allt mer kunskap om behovet av ljus för allt liv. Ljus behövs för växternas fotosyntes och djurens seende, men de flesta levande organismer använder också ljus som en signal utifrån för att styra in sin utveckling på ett optimalt liv. Ett par exempel på ny kunskap som man ännu knappast börjat använda:

Ledande forskare betonade redan före 1960-talet att ögat i huvudsak registrerar förändringar och kontraster. Det finns dock fortfarande ett allmänt spritt tankesätt att ögat tar emot fotoner och att varje foton översätts till en del i en ljusupplevelse.

De senaste tio åren har man med växande intresse noterat att de retinala ganglie-cellerna[1] stimuleras av ljus och påverkar människans cirkadiska[2] rytm.

Det finns nya tekniska möjligheter att skapa dynamiskt och situationsanpassat ljus. Lysdiodtekniken ger teoretiskt sett möjlighet att skapa det spektrum och den ljusdynamik användaren vill ha. Genom att kombinera nya ljuskällor, ny elektronik, sensorer och informationsbehandling kan vi utveckla systemlösningar på ett mycket flexibelt sätt.

Det finns affärsmässiga öppningar för nya former av teknik- och affärsutveckling genom entreprenörskap som skapar nya trender inom ljussektorn.

För att komma vidare med samspelet mellan nya möjligheter är det miljö- och näringslivsmässigt viktigt att öppna upp för flervetenskapligt samarbete.

Bakgrund affärsutvecklingsmöjlighet

EU-regleringen och de nya tekniska möjligheterna gör att förändringstrycket inom belysningsbranschen är hårt. De växande affärsmöjligheterna för LED[3] leder till att en del framtidsinriktade elektronikföretag intresserar sig allt mer för belysningsbranschen, vilket öppnar upp för nya former av affärstänkande och utvecklingsmöjligheter. Det finns starka skäl att verka för en snabb introduktion av den nya tekniken, för att spara energi i samklang med att skapa en mer attraktiv belysning. Samtidigt finns det risk att en allt för hastig introduktion av den nya tekniken leder till olika former av missförstånd. Det kan även resultera i bristfällig funktion, speciellt om nya aktörer försöker ta marknadsandelar genom att introducera billiga produkter som bygger på tidiga versioner av den nya ”fantastiska” tekniken.

Skriften redovisar en översikt av teknikområden som är viktiga för konkret samhällsnytta av de

[1] Näthinnans ljusförnimmande ganglieceller, ”the intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells” (ipRGC), kompletterar stavarna och tapparna. De benämns också 3e receptorn och har kopplingar till den del av hjärnan som anpassar kroppens dygnsrytmer till om det är natt eller dag.

[2] Biologiska rytmer som styr djurens sömn och vakenhet, och växternas rytmer under dygnet.

[3] LED: Light Emitting Diode, lysdiod, halvledare som transformerar elektrisk energi till ljus

nya tekniska möjligheterna och den framväxande vetenskapliga kunskapen. Det är angeläget att göra den nya tekniken långsiktigt attraktiv för en mångfald av kunder och intressenter. Om kunderna upplever att den nya formen av belysning blir dålig, att den nya tekniken är besvärlig, otillförlitlig eller att livslängden är kortare än utlovat, finns det risk att den fortsatta introduktionen av ny högkvalitativ energieffektiv belysning blir kraftigt fördröjd.

Energimyndighetens forskningsprogram *Energieffektivisering för belysning* tar fram ny viktig kunskap kring flera delar i affärssystemet. Det är önskvärt att utveckla en tydligare gemensam ”karta”, som höjer förmågan att förstå och kommunicera kring de nya möjligheterna. Detta för att på ett snabbt och sammanhängande sätt kunna nyttiggöra den nya tekniken, i kombination med den framväxande kunskapen, i konkret affärsutveckling. Det är viktigt att undvika missförstånd, både mellan olika affärsaktörer och i kommunikationen med kunderna.

Tiden från att en produkt introduceras på marknaden tills den ersätts av en ny version är mycket kortare för de nya ljuskällorna än vad branschen är van vid för de konventionella formerna av ljus-källor. Det är viktigt att öka den svenska belysningsbranschens förmåga att ta nytta av den nya formen av mer dynamisk affärspotential. Miljö- och användarmässigt är det viktigt att skapa situationsanpassade lösningar med tillräckligt lång livslängd.

Skriftens innehåll

Avsikten med skriften är att förklara ljusets koppling till ledande forskning inom olika vetenskapsfält. Ambitionen är att göra en lättläst text för den bildade lekmannen. Ljuset har koppling till estetiska och psykologiska aspekter och i kopplingen till de stora tekniska utvecklingsmöjligheterna för dagens halvledarteknik finns mycket att vinna. Det växer också fram allt mer ny kunskap om ljusets medicinska betydelse.

Skriften kan läsas som ett underlag för uppbyggnad av ett flervetenskapligt kompetenscentrum för ljus. Målet är att öppna upp för tvärvetenskaplig dialog.

1
VAD ÄR LJUS?

Ljuset är betydelsefullt på många olika sätt. Ljus i kontrast till mörker, ljus som möjliggör seende, ljus som nödvändig stimulans för vårt synsinne. Ljusstrålningen från solen är jordens viktigaste värmekälla och en ovärderlig energikälla för fotosyntesen. Ljuset är fysiologiskt viktigt för allt liv och begreppet ”ljus” har också flera former av estetisk och symbolisk betydelse.

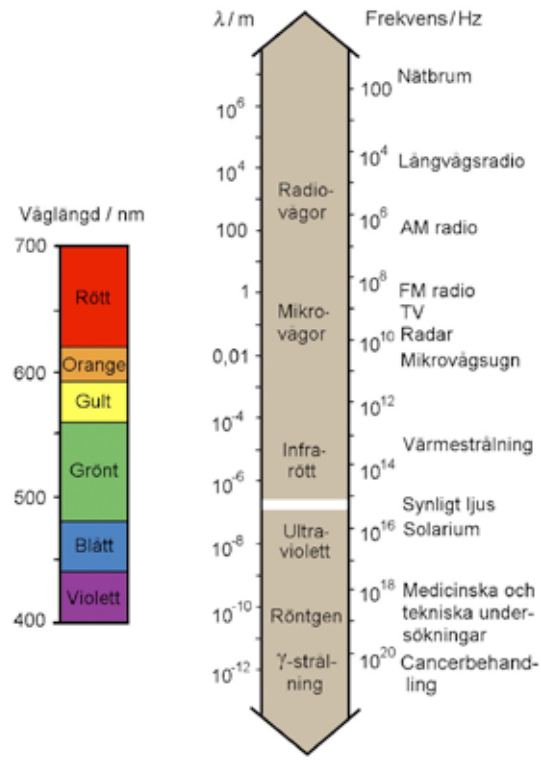
Ljus som fysikaliskt fenomen

Det kan tyckas som om en fysiker krånglar till det i onödan när hon eller han ibland pratar om ljus som en vågrörelse och emellanåt väljer att beskriva ljuset som en partikel, en foton. Men det krångliga ligger inte i begreppen, utan just i dualiteten – att ljus faktiskt är både en våg och en partikel, och kanske framför allt i det faktum att det är vi själva som väljer hur vi vill beskriva ljuset.

Oavsett om vi väljer våg- eller partikelbeskrivningen är ljusets utbredningsfart i vakuum 300 000 km/s. Farten är konstant och oberoende av om ljuskällan rör sig eller inte. Farten ändras när ljuset går genom ett material. Gaser minskar farten obetydligt medan t.ex. glas reducerar farten med upp mot 50 %. Kvoten mellan ljusets fart i vakuum och i ett material kallas för materialets brytningsindex, *n*. Att ljusfarten ändras vid övergång mellan olika material leder till fenomen som ljusets brytning.

Fysikaliska fenomen som brytning, böjning och interferens[4] förklaras med hjälp av vågrörelsemodellen för ljus. När vi däremot beskriver fotoelektriska, fotokemiska eller fotobiologiska förlopp använder vi fotonmodellen. I dessa processer är det just den enskilda fotonens växelverkan med en atom eller en molekyl som beskrivs, och energin hos fotonen är därför avgörande.

Ljusets energiinnehåll beskrivs av ljusets våglängd. För synligt ljus kan olika våglängder sägas motsvara olika färger. Eftersom våglängden kan skrivas som kvoten mellan ljusets utbredningsfart *c* (som ju är konstant) och frekvensen *f*, kan energiinnehållet lika gärna beskrivas med hjälp av ljusets frekvens. Även om begrepp som våglängd och frekvens förefaller vara typiska vågrörelsebegrepp,



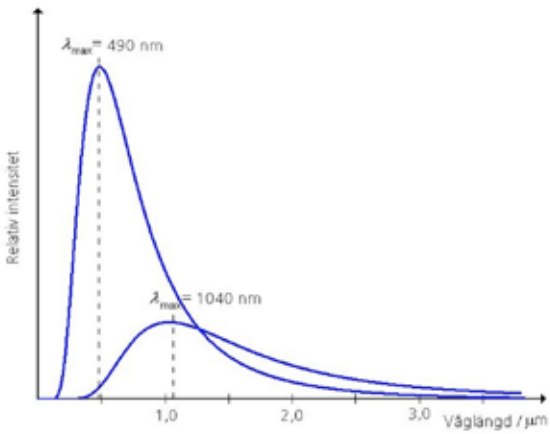
Figur 1.
Ovan den synliga delen av det elektromagnetiska spektrumet med våglängder mellan 400nm och 700nm. Till höger hela det elektromagnetiska spektrumet.

[4] Ett enkelt exempel på interferens är färguppdelning av vitt ljus med hjälp av ett gitter.

används de också för att beskriva fotonens energi[5]. Figur 1 visar att våglängden för blått ljus är kortare än för rött ljus. Vi ser också hur de våglängder vi kallar ”synligt ljus”, ca 400 nm – 700 nm, förhåller sig till resten av det elektromagnetiska spektrumet[6].

Källor till ljus

Solen är den himlakropp i vars ljus människan utvecklats. Solljuset har därför en särställning i vår uppfattning om vad som är ”naturligt” ljus. Solen kan i all enkelhet beskrivas som en glödande het

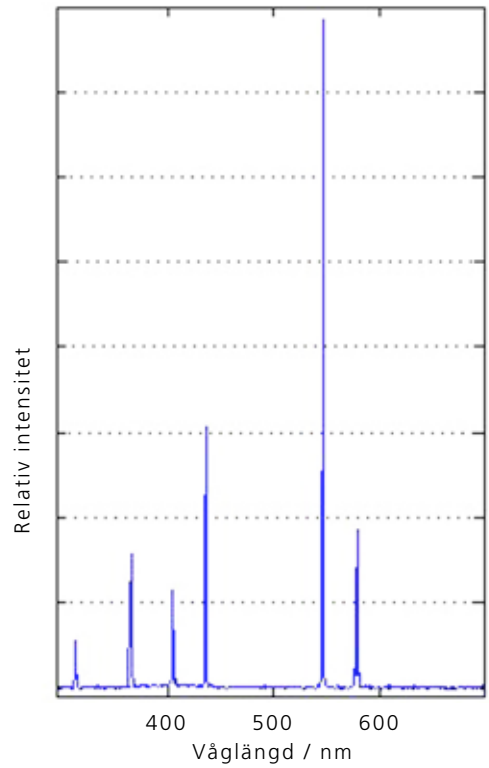


Figur 2.
Spektrumets utseende för solen max= 490 nm (respektive för en glödlampa max=1040nm)

kropp. Solen producerar sin egen energi via fusion, d.v.s. sammanslagning av väte till helium, och håller denna temperatur konstant – i balans med omgivningen. Vi kallar solen för en temperaturstrålare eftersom det utsända ljusets intensitet och spektrum entydigt bestäms av temperaturen. Då det är solens yta vi ser, är det yttemperaturen 5600°C som karakteriserar solens spektrum, se Figur 2, trots att temperaturen i solens centrum tros uppgå till nära 15 miljoner °C .

Glödlampan i dess olika varianter är temperaturstrålare i vilka en glödtråd värms elektriskt till hög temperatur. Glödtrådens temperatur överstiger sällan 2500°C p.g.a. att materialets smältpunkt ligger strax däröver. Spektrumet från en glödlampa är därför kraftigt förskjutet mot infrarött i jämförelse med solspektrumet, se Figur 2. Största delen av den utstrålade energin, > 90 %, faller inte i det synliga området och glödlampan är således bättre som värme- än som ljuskälla.

Långt effektivare, än att skapa ljus med hjälp av ett fast material i form av en glödtråd, är att skapa ljus i en gas. I ett lysrör eller en lågenergilampa tillförs gasens enskilda atomer energi så att dessa skickar ut sitt för atomslaget karakteristiska ljus – sitt unika spektrum. Avståndet mellan atomerna är i en gas så stort att atomerna inte påverkar varandra. Därför innehåller ljuset från gasen bara de diskreta våglängder, färger, som utgör atomslagets, d.v.s. varje enskild atoms, fingeravtryck. I Figur 3

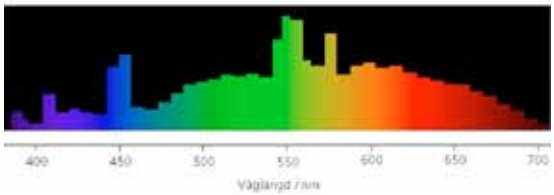


Figur 3.
Kvicksilverspektrum.

[5] Vi kan skriva fotonenergin som $w_{foton} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot f$ där h är Plancks konstant.

[6] Elektromagnetisk strålning är den övergripande benämningen på en vågrörelse/foton som utbreder sig med ljusets fart.

syns färginnehållet i lysande kvicksilvergas. De stora skillnaderna mellan detta och färginnehållet från temperaturstrålaren gör att vi också upplever ljuset helt olika. Ljuset från kvicksilvergasen domineras



Figur 4.
Spektrum från lysrörlågenergilampa innehållande kvicksilver.

av blåa våglängder som gör att helhetsupplevelsen blir ett obehagigt kallt ljus. I ett konventionellt lysrör/lågenergilampa alstras ljuset av just kvicksilveratomer som tillförs energi elektriskt. För att flytta energin till synligt ljus och göra ljuset användbart beläggs insidan av lysröret med ett lyspulver som ”smetar ut” det diskreta färginnehållet, se Figur 4.

Vad är färg?

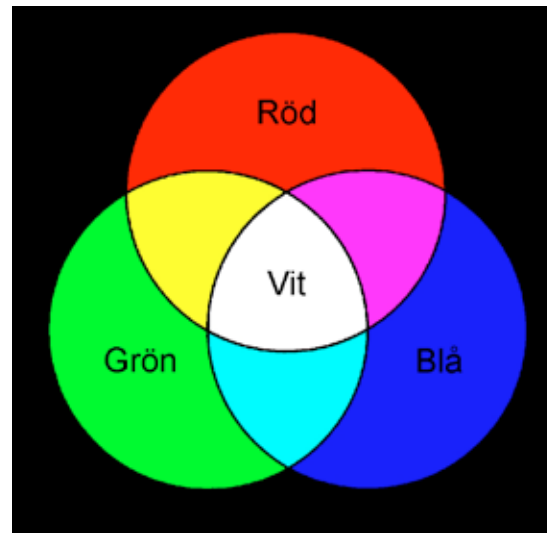
Vår upplevelse av färg beror på ljusets spektrala fördelning. Ljus som innehåller alla synliga våglängder av ungefär samma intensitet, upplevs som vitt. Oavsett hur detta ljus har skapats, om det är solljus eller glödlampsljus, är belysning med ljus med ett stort antal våglängder förutsättningen för att föremål ska kunna upplevas ha olika färger. Ett material upplevs t.ex. som grönt om allt rött och blått ljus effektivt absorberas av materialet och endast det gröna reflekteras tillbaka till ögat. Skulle materialet absorbera endast det blåa ljuset reflekteras såväl rött som grönt och vår upplevelse av färg-blandningen rött och grönt blir gult, se Figur 5. Saknas rött ljus i belysningen kommer ljuset att ha en märkligt ljusblå (cyan) färg och upplevelsen av det föremål som i vitt ljus ser gult ut blir istället grönaktigt.

Denna s.k. additiva färgblandning som kan användas för att skapa vitt ljus innebär att rött, grönt och blått ljus (RGB) av olika styrkor blandas. Denna typ av färgblandning bygger också upp färgåtergivningen i en TV eller i en datorskärm. Sådana består av runt en miljon bildpunkter som lyser i de tre RGB-färgerna. Lyser alla tre färgerna lika starkt ser bildpunkten vit ut, lyser bara röd och grön ser bildpunkten gul ut osv.

En ljuskälla uppbyggd av ljusalstrande komponenter (idag lysdioder, LED) i de tre grundfärgerna RGB, ger alltså möjligheter till god belysning och en färgmässigt behaglig upplevelse av omvärlden. Då intensiteten på de tre färgerna kan varieras kontinuerligt och var för sig finns möjligheter till anpassning av ljussammansättningen för en mängd olika behov med hjälp av en och samma ljuskälla.

Ljus som informationsbärare

Ljuset fungerar som energi- och informationsbärare. Växterna använder solljus som energikälla för sin tillväxt och som informationskälla för att anpassa sin tillväxt till omgivningens förutsättningar. För djuren är ljusets direkta användning att det fungerar som en bärare av information om omgivningen, via explicit seende. Vi tolkar också vår anpassning till omgivningen via känslostämningar. Vi lever och



Figur 5.
Additiv färgblandning. Rött, grönt och blått (RGB) adderas. Om alla tre färgerna blandas i rätt proportion kan summan upplevas som vitt ljus.

upplever genom våra fem sinnen. Smakrikedom, goda dofter, beröring, njutbar musik och ljusbalans ger förutsättningar för ett upplevelserikt och kvalitativt liv. Synen är central. Utöver de medvetna synintrycken påverkar även ljuset våra hormonbalanser som t.ex. styr sömn och vakenhet. Indirekt påverkar ljuset också vår allmänna hälsa, där många sjukdomstillstånd som t.ex. depression eller hjärtsvikt är vanligare under den mörka årstiden.

Det mänskliga ögats funktion beror bland annat på linsens och pupillens kondition, stavarnas och tapparnas känslighet och linsens transmittans för ljus. När vi åldras försämras flera delar i ögats funktion. Linsen förlorar gradvis sin förmåga att fjädra tillbaka och det leder till att det blir svårt att fokusera på näraliggande föremål. Linsen blir också mer gulaktig och absorberar allt mer blått ljus. Belysningens kvalitet är därför särskilt viktig för äldre personer.

För människan är ljuset en central informationsbärare. I och med att vi börjat odla har vi också förbättrat människans förmåga att ta nytta av dagsljusets energi. Vi börjar nu i växande grad ta nytta av solceller för att på ett mer flexibelt sätt nyttiggöra solljusets fysiska energi.

En välutvecklad ljussättning skapar raffinerad möjlighet att tolka och förbättra vår anpassning till omgivningen. Förekomsten av oljus[7] betyder att det är en ofullkomlig belysningslösning. Analoga tankesätt är också viktiga i många andra sammanhang. En hög nivå av energianvändning är generellt sett en indikation på att man sliter med att tvinga fram en process som egentligen inte är anpassad till förutsättningarna. Om man t.ex. baserar konstruktionen av en dammsugare på att man kan använda mycket kraft för att driva den så kan man åstadkomma en acceptabel sugkraft med primitiv design, dålig fläkt, dålig motor och dåliga lager. Sådana lösningar tenderar att leda till att apparaten bullrar och blir varm, vilket bl.a. betyder att materialet slits så att man genererar mer finkornigt damm.

När processindustrin har arbetat med att spara energi har engagemanget i att förstå hur det egentligen fungerar ofta också resulterat i process- och produktförbättringar. Det höga energipriset i Japan har tolkats som en viktig förklaring till att Japan har varit så bra på teknikutveckling. Då man försöker spara energi leder studierna och eftertanken till djupare förståelse av de aktuella processerna.

Allmänt sett förbättras möjligheterna att skapa en lösning med bra anpassningsförmåga då vi förbättrar kunskapen om ljusbehovet och de möjliga ljusskapande processerna och arbetar med att förbättra kopplingen.

[7] Begreppet "oljus" har myntats av Klas Sjöberg, överläkare kliniska vetenskaper. Begreppet används analogt med "oljud". Under dialogen i projektet har vi funnit det användbart att tala om betydelsen av att undvika oljus, som en del av begreppsapparaten för att förklara visionen med den flervetenskapliga och innovativt inriktade satsningen på att skapa bättre belysning.

2
LJUS, ENERGI, RESURSFÖRSÖRJNING OCH MILJÖ

Oljus är hittills knappast observerat som miljöproblem, men det finns ett begynnande intresse för ”light pollution”. Som en jämförelse kan man notera att oljud är mer observerat som miljöproblem och att det finns ganska mycket reglering av maximala ljudnivåer. Huvuddelen av miljöintresset har dock hittills fokuserat på utsläpp av kemiska ämnen som orsaker till olika former av miljöproblem.

Energimässigt sett transformeras huvuddelen av ljusstrålningen efter hand till längre våglängder och ljuset inomhus omvandlas efter hand till stor del till värme. Drivkraften för fotosyntesen och andra fotokemiska reaktioner, liksom för solceller, bygger på att ljus har hög exergi, d.v.s. stor kapacitet för att kunna användas som konstruktiv drivkraft. Elenergi har också hög exergi och därför finns det stor potential för att utveckla effektiva transformeringar mellan ljus och el. I de flesta tekniklösningar hittills förlorar man dock en stor del av den aktuella ljus- och elenergin som spillvärme. I en del fall blir spillvärmen från glödlampor en behovsstyrd form av uppvärmning, eftersom vi i t.ex. Svenska villor ofta tänder ljuset då det behövs värme. I de fall då man kyler eller behöver kyla t.ex. kontor är det viktigt att undvika spillvärme. Då man gör miljö- och samhällsanalyser för olika belysningslösningar är det viktigt att ta hänsyn till både negativa och positiva sekundära effekter, t.ex. nyttan av spillvärme och resursvärdet i restmaterial.

För att kunna ta relevant nytta av energi- och miljöanalyser är det nödvändigt att göra jämförelser av vad som sker då man gör olika förändringar och mellan alternativa lösningar. En grundläggande svårighet är att nyttan av produkter ofta förändras vid miljöanpassningar eller är något olika för olika produkter och lösningar. Standarden för livscykelanalys (LCA) fokuserar därför på en kvot mellan miljöbelastning och nytta. Nyttan mäts i antal funktionella enheter, t.ex. liter kylskåpsvolym vid en viss temperatur och en definierad användning under en viss tid (dm^3 x år). Det bör noteras att LCA betyder Life Cycle Assessment, vilket egentligen borde översättas till livscykelbedömning.

De flesta LCA fokuserar hittills på miljöbelastningen (täljaren i kvoten). Vi börjar därför med att beskriva hur man arbetar med miljöanalysen. För att klargöra miljöbelastningen av en viss produktlivscykel analyserar man emissionen av grundämnen och kemiska föreningar. Analysen skall inkludera samtliga steg från råmaterialutvinning, via tillverkning, transporter och användning av produkten, till hanteringen och effekterna av restmaterialen. För att göra en miljöanalys måste man bestämma sig för vilka ämnen man skall inkludera i analysen. Man måste också bestämma sig för hur stort system man skall inkludera i analysen – hur långt man skall gå i att räkna med indirekta effekter och bakomliggande miljöbelastningar, t.ex. andelar av miljöbelastningar för att tillverka produktionsutrustningar och för att bygga lokaler. Många processer ger flera former av produkter och då måste man fördela (allokera) miljöbelastningen mellan de olika produkterna. Om produktmaterialet är återvunnet och/eller återvinns till en annan efterföljande produktlivscykel måste man bestämma sig för hur man skall värdera dess miljömässiga resursvärde. En stor del av dagens LCA fokuserar på växthusgaser och energirelaterade miljöbelastningar.
Ur ett bredare perspektiv borde man även analysera möjliga kopplingar till fler former av miljö-effekter, t.ex. toxiska risker, biologisk mångfald, försurning, övergödning och stratosfäriskt ozon. Det finns

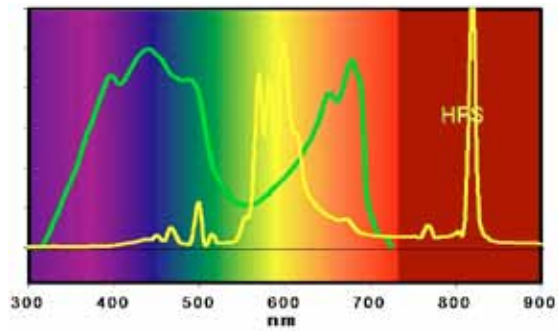
ett antal metoder för att väga samman olika former av miljöbelastningar till aggregerade mätetal. Sammanvägningen av olika ämnen till aggregerade mått på en viss form av miljörisk kan till stor del baseras på naturvetenskaplig kunskap. För att väga samman olika former av miljörisker till summerande mått måste man inkludera mänskliga värderingar, t.ex. genom att tolka politiska prioriteringar och ”mäta” betalningsvilja.

De flesta LCA för ljuskällor har hittills fokuserat på elförbrukningen under användningsfasen. Den nya tekniken gör att elförbrukningen kan reduceras väsentligt. Samtidigt innehåller de nya ljuskällorna fler speciella material och en hel del inbyggd elektronik. De ovanliga materialen är ofta mer okända och främmande miljömässigt sett och även mer krävande att utvinna. Det finns därför motiv för att i högre grad studera miljöaspekterna för de material som ingår i de nya ljuskällorna. Om elförbrukningen under användningsfasen blir väldigt liten eller om elen produceras på ett miljömässigt oproblematiskt sätt blir elförbrukningen relativt sett miljömässigt oproblematisk. Det finns därför växande motiv för att göra bredare LCA för de nya energisnåla ljuskällorna.

Miljöbelastningen bestäms med andra ord av tre steg:

- momenten före själva belysningssituationen, från att råmaterialen utvinns tills produkten är klar för användning, inklusive belastningar från transporter
- miljöbelastningar för att generera den el som utnyttjas under användandet, inklusive positiva och negativa miljöeffekter av spillvärme
- samt av vad som händer efteråt - med miljöbelastningar från hantering och deponi av restmaterial och eventuellt gottskrivande för återvinning av material och för de komponenter som återanvänds.

Eftersom man arbetar med en kvot är det lika viktigt att öka nyttan som att minska belastningen. Mängden explicit huvudfunktion mäter man i antal funktionella enheter. I de flesta fall får man dock också kvalitativa skillnader i den nytta som genereras. Rationellt sett är möjligheten att ta betalt för en ljuslösning beroende av ljusupplevelsens kvalitet. Belysningens affärsmässiga och mänskliga nyttovärde är beroende av ljusets upplevda kvalitet. För att kunna utveckla, sälja och tillverka system som ger högkvalitativt ljus är det grundläggande att kunna specificera den önskvärda ljuskvaliteten och förklara dess fördelar, begränsningar och nackdelar. För belysning mäter man ofta effektivitet som lumen per watt och till en del fungerar det mätetalet som en LCA-kvot. Miljö-belastningen varierar i och för sig med hur den använda elektriciteten har producerats, men den problematiken tar vi inte upp här. Belysningsmässigt sett är det mer relevant att fundera på i vilken grad och i vilka situationer lumen är ett bra nyttomått för belysning. Ett tydligt exempel på att lumen är ett missledande mått är att det används för högtrycksnatriumlampor i växthus, trots att HPS-ljuset är gulgrönt. Växterna har större nytta av rött och blått ljus, se Figur 6.
Att skapa en vacker och trivsam belysning handlar till stor del om andra saker än ljusmängd. Man arbetar med beskrivande tal som färgtemperatur, men det är en ofullständig form av beskrivning.



Figur 6.
Fotosyntesens nytta av olika våglängder och spektralfördelningen för en HPS-lampa.
Återgiven efter tillstånd av Sylvain Dubé.

Då man betraktar ett belysningssystem är det viktigt med situationsanpassning, relativa ljusnivåer, bländning, dynamik och ljusstyrning. Ögat reagerar egentligen knappast på ljusmängd, utan snarare

på dynamik och kontraster. Det finns behov av att utveckla begreppsbildningen för beskrivning av vad som är bra ljus.

Ur LCA-perspektiv är det lika grundläggande att skapa ett mer högvärdigt ljus som det är att minska miljöbelastningen per ljusupplevelse. En uppmärksammad bok om att det inte räcker att göra mindre fel utan att det långsiktigt sett är ännu viktigare att göra mer rätt är den återvinningsbara plastboken *Cradle to cradle* (McDonough 2002).

Det elektriska ljusets historia

Det elektriska ljuset har de senaste hundra åren dramatiskt förändrat förutsättningarna för mänskligt liv. Större delen av tiden har det viktigaste målet varit att skapa mer ljus så att fler kan arbeta och vara aktiva en större del av dygnet.

För att kunna handla med ljuskällor satsade man tidigt på att ta fram mätetal för mängden ljus. Man betonade behovet att definiera mänskligt meningsfulla mätetal och valde därför att göra psykologiska mätningar för att klargöra den relativa ljushetsupplevelsen av ljus med olika våglängder. Det var ett viktigt flervetenskapligt genombrott att man på 1920-talet lyckades ta fram och vinna acceptans för V(λ)-kurvan. Kurvan standardiserades av CIE och har sedan kommit att användas som en generell beskrivning av ögats känslighet för olika våglängder av ljus. Kurvan har sedan dess använts som om den vore en allmängiltig sanning och det tycks som om man under lång tid knappast arbetade med att utveckla den grundläggande begreppsapparaten för ljus.

Som framgår av denna skrift har det, under de senaste decennierna och i synnerhet de senaste åren, vuxit fram ny väsentlig kunskap om hur växter, djur och människor påverkas av och tar nytta av ljus. Det har dock inte forskats så mycket på de flervetenskapliga sambanden och man har knappast kommit framåt med att ”översätta” den nya grundläggande kunskapen till allmänt använda begrepp och mätetal.

3
BEGREPPSBILDNING

Eftersom belysningssektorn befinner sig i en förändringsfas bör vi inte betrakta ljusbegreppen som statiska sanningar, utan snarare som dynamiska verktyg för ömsesidig förståelse. Parallellt med att vi använder de ljusord som utvecklats bör vi också tänka på hur vi kan vidareutveckla förståelsen kring det som orden beskriver, hur vi kan vidareutveckla orden som verktyg för dialog.

Arbetet med begreppsutveckling bör baseras på gedigen vetenskaplig kunskap. För att möjliggöra meningsfull tvärvetenskaplig dialog är det viktigt att skapa en sådan gemensam begreppsbildning att personer från olika vetenskapsområdena kan förstå varandra, på en tillräckligt avancerad nivå. Det finns flera former av utmaningar för begripliggörandet av den etablerade vetenskapliga kunskapen. Detta är påtagligt för speciell och djupgående kunskap. Problematiken är ofta svår att hantera för allmänt använda begrepp som olika ämnesområden och personer tolkar på olika sätt. Det här vore svårt redan om den vetenskapliga kunskapen vore statisk. Det är ännu svårare då kunskapen förändras och dagens läge för ljuskunskap är mycket dynamiskt och komplext.

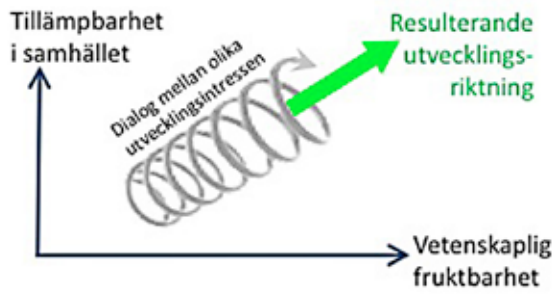
Utöver utmaningen med tvärvetenskaplig dialog är det också viktigt att knyta an till den allmänt använda begreppsbilden och att samspela med begreppsutvecklingen i samhället, se Figur 7. För att få verklig betydelse är det viktigt att begreppen kan uttryckas på ett enkelt och tydligt sätt.

Det är väsentligt att utveckla förmågan att verka via känslomässig intuition och inte enbart kognitivt via explicit saklig information. Det är viktigt att olika former av yrkesverksamma börjar intressera sig för nya sätt att beskriva ljus, så att de kan medverka i en sund introduktionen av nya former av mer hållbara och avancerade belysningslösningar. Det är väsentligt att ta fram en begreppsapparat som öppnar upp för att kunna informera allmänheten om olika former av ljuskvaliteter och nya former av belysningsteknik. Avsnitten 3.1 och 3.2 beskriver den gemensamma begreppsbildningens betydelse för tvär-vetenskaplig dialog och 3.3 tar upp teorier för innovativ samhällsutveckling genom samarbete mellan företag, akademi och samhälle.

Begreppsbildning som bas för tvärvetenskap

För att de nya tekniska möjligheterna skall komma till nytta och bli verkligt intressanta för seriös affärsverksamhet är det grundläggande att kunna klargöra vilka ljuslösningar som är bra, mänskligt sett. Diodforskarna säger att om vi ”bara” talar om vilket ljus vi vill ha så fixar de det. Men vilket ljus vill vi ha, hur bör och kan det beskrivas och specificeras?

De fotometriska mätetalen lumen och lux utvecklades för glödlampor. Begreppsbildningen kring färgtemperatur har utvecklats för att kunna skilja på olika former av lysrör. Miljöpsykologiskt sett vet vi att vi mår bra av dagsljus. Men dagsljus kan vara så väldigt olika; vid olika tider, på olika



Figur 7.
En dynamisk dialog mellan forskare som utvecklar kunskap och samhällets användning av kunskap inom det aktuella området, som grund för ömsesidigt lärande och stimulans för en ständig utvecklingsprocess.

platser och i olika byggnader. Vilken sorts ljusspråk är det vi borde utveckla?

Till vilken del är den kommunikativa utmaningen en tvärvetenskaplig akademisk problematik? Till vilken del är det en mer djupgående mänsklig ”problematik” och möjlighet?

Den tvärvetenskapliga dialogen inom ljussatsningen har kommit igång på ett spännande sätt. Det är fascinerande att höra gruppens växtbiologer, medicinare och fysiker tala om analogier mellan hur respektive område ser på olika former av ”kemiska föreningar”. Den generella erfarenheten från andra satsningar på tvärvetenskap är ett bra gränsöverskridande samarbete kräver mycket av deltagarna. Det är påtagligt att det finns behov av att uppdatera och utveckla begreppsapparaten för dialog kring hur vi kan skapa bättre ljussättning.

Människors tänkande och agerande styrs i hög grad av tidigare erfarenheter. Vi sparar tid genom att lära oss rutiner och vi känner trygghet i de tankesätt vi är hemtama med. Inom den akademiska världen görs de flesta erfarenheterna inom endisciplinära vetenskaper och personer inom olika ämnesområden kan olika saker. Det är också påtagligt att akademiker och företagare har levt med skilda former av förutsättningar, och att teoretiker och praktiker arbetar på olika sätt.

En grundläggande ambition med den flervetenskapliga ljussatsningen är att möjliggöra tydligare dialog kring vad som är bra ljus. Allt sedan introduktionen av artificiellt ljus har intresset i huvudsak fokuserat på att producera mer ljus. Det är därför svårt att förändra målbilden till att på ett tydligare sätt tillsammans arbeta för ”bättre” ljus. För att förklara varför det är så svårt att ändra målet från kvantitet till kvalitet beskrivs beskrivs i det nedanstående avsnittet om att ”Mer och större är inte alltid bättre” .

Utmaningarna med tvärvetenskap

De som arbetar med tvär- och flervetenskap vittnar om att det är grundläggande att uppnå ömsesidig förståelse. De som har erfarenhet av tvärvetenskap betonar ofta att detta är svårt, mycket svårare än vad de flesta är medvetna om. Olika ämnesområden arbetar med olika tankesätt, olika begrepp och ibland använder man ett och samma ord på olika sätt, med olika betydelser. För en miljövetare som gör LCA är en produktlivscykel tiden för en fysisk produkt; från råmaterialutvinning, via produktion och användning, till restmaterialhantering. För en ekonom i ett företag är en produktlivscykel den tid en viss produktversion finns på marknaden. Introduktionen av LED gör att den fysiska produktlivscykeln för ljuskällor blir väsentligt längre. Samtidigt är den marknadsmässiga produktlivscykeln nu väsentligt kortare, än för de konventionella ljuskällorna, för de produkter som är baserade på de nya formerna av teknik. Framtagningen och användningen av ljuskällorna blir också allt mer kunskapsintensiv. Kombinationen av de tekniska möjligheterna och den växande kunskapen om hur vi påverkas av ljus understryker vikten av tvärvetenskapligt samarbete.

Tvärvetenskap ur ett filosofiskt perspektiv

Fruktbara möten mellan olika vetenskaper kan ske på olika plan. Inte sällan handlar det om att formulera problem som den egna vetenskapen inte kan lösa och ta hjälp av samarbete med forskning inom andra områden. Lysdiodforskaren som efterfrågar ett svar på frågan om vad som är bra ljus är ett typexempel. Klimatforskaren som har identifierat kritiska faktorer[8] och vänder sig till samhällsvetaren med dessa för att initiera forskningsprogram om beteendeförändringar är ett annat. Intressanta begrepp kan ibland överföras mellan ämnesområden. Ett annat exempel är begreppet resiliens[9], som förekommer såväl i psykologi, materialvetenskaper, som inom miljövetenskap.

[8] Det är kritiskt för klimatet om man påverkar faktorer som kan utlösa irreversibla förändringar av jämviktsläget för jordens klimatsystem, se *Tipping Elements in Earth's Climate System,* (Lenton et al. 2008)

[9] Ekologisk resiliens är ett mått på ett ekosystems förmåga att tåla störningar och återhämta sig.

Belysning är ett exempel på att det finns betydande behov av att uppdatera och klargöra begreppsbildningen. På en mer grundläggande nivå handlar det om att gå från ett statiskt synsätt på hur man använder begreppsapparaten till ett dynamiskt där man vidareutvecklar begreppen samtidigt som man använder dem. Det är önskvärt att förbättra förmågan att kombinera olika former av forskningsmetodik i en och samma studie.

Fruktbara möten kan resultera i ett utbyte eller en komplettering av metoder eller strategier för att beforska ett problem. Viljan att komplettera kvantitativa metoder med kvalitativa, eller tvärtom, har ofta sitt ursprung ur möten mellan olika vetenskaper eller forskningstraditioner. Det stora intresse som idag finns för ”mixed methods” (se t ex Tashakkori & Teddlie 2003) är ett typiskt exempel. Denna form av tvärvetenskapligt samarbete kräver avancerad ”orkestrering” (se t ex Kallen 1946 och Nowotny et al. 2001) av forskarsamhället och ett öppet förhållningssätt till teoribildning. Ett exempel på ämnesområde som i Lund arbetar med flervetenskaplig ljusarelaterad forskning är miljöpsykologi.

Det är en gradskillnad mellan fenomenet med enskilda begrepp som färdas mellan vetenskaper till ambitiösa tvärvetenskapliga projekt, som strävar efter att skapa en gemensam begreppsapparat och ett gemensamt teoretiskt ramverk. Sådana projekt påminner, i större eller mindre skala, om skapandet av en ny vetenskap.

Eventuella svårigheter som behäftar sådana försök ska inte undervärderas. Det kan vara svårt nog att sammanjämka tankar och idéer inom en och samma vetenskap, speciellt om det skiljer några år mellan dem. En viktig orsak är att många begrepp är sammanflätade med ett stort antal andra begrepp. En olikhet någonstans i begreppssystemet kan ibland omöjliggöra jämförelser och förståelse. Fysikern Pierre Duhem anmärkte på hur svårt det var att förstå 50 eller 100 år gammal fysik. Han talade om ”inkommensurabilitet”, vilket också vetenskapsteoretikerna Thomas Kuhn och Paul Feyerabend och många senare forskare gjort.

> If the theories admitted by this physicist are those we accept, […] we speak the same language and can understand each other. But that is not always the case. It is not so when we discuss the experiments of a physicist who does not belong to our school; and it is especially not so when we discuss the experiments of a physicist separated from us by fifty years, a century, or two centuries.
>
> (Duhem 1905/1954: 147-148)

Kuhn menar att det bara är vid speciella tillfällen som fysiker kan förstå världen på fundamentalt nya sätt:

> It is rather as if the professional community had been suddenly transported to another planet where familiar objects are seen in a different light and are joined by unfamiliar ones as well.
>
> (Kuhn 1970: 111)

Det finns en ofta använd bild av att inomvetenskaplig forskning är teoridriven medan mång- eller tvärvetenskaplig forskning är problemdriven (utan att bekänna sig till den uppfattningen tecknar t ex Sintonen 1990 en teori- och en problemdriven paraplymodell; se också Gibbons et al. 1994). I den utsträckning forskningens utveckling styrs av sina egna inomvetenskapliga teorier sätter hinder som inkommensurabilitet[10] käppar i hjulen för fruktbar tvärvetenskaplig dialog. Men sanningen är kanske att också inomvetenskap ofta är mer problemdriven än så. Existerande teori- och begreppsbildning är ofta inte så tight att begrepp inte kan delas mellan flera olika vetenskaper. Därför ska man inte begå misstaget att tro att problemen med nya begreppsbildningar alltid är likadana, lika allvarliga, eller leder till lika stora hopp i vår förståelse.

[10] Inkommensurabilitet, ojämförbarhet, innebär att grundläggande begrepp inom konkurrerande teorier definieras på sådana sätt att de inte kan jämföras på ett meningsfullt sätt.

Ljuskvalitet

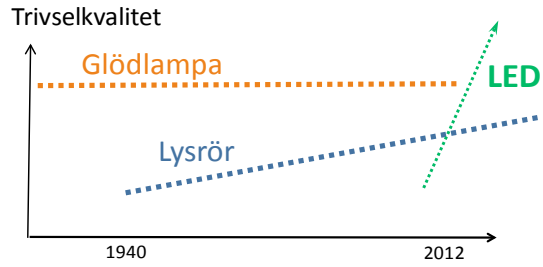
Då man beskriver ljuskällors värde förutsätter man normalt att en ljuskälla är mer effektiv om den ger fler lumen per watt (lm/W). Indirekt resonerar man då som om det enda målet är att producera många lumen. Samtidigt tycks de flesta svenskar anse att glödlampan ger bättre ljus än lysröret. När man i det sammanhanget säger bättre ljus menar man ofta trevligare ljus. Figur 8 ger en principiell jämförelse av olika ljuskällor i termer av upplevd ljuskvalitet.

Ur perspektivet i Figur 8 bör utvecklingen av LED-baserade ljuskällor inriktas på att uppnå hög trivselkvalitet. De etablerade mätetalen för ljuskvalitet beskriver ljusets färgtemperatur och färgåtergivning. Då man går djupare i analysen är trivselkvaliteten också situationsberoende. Det är viktigt att kunna definiera vad som krävs av ljuset för att uppnå en hög trivselkvalitet. LED ger stora tekniska möjligheter att utveckla ljuskällor som ger den form av ljus som man önskar.

Mer och större är inte alltid bättre

Intresset för belysningsstyrka och högre lm/W är ett exempel på det sedvanliga tankesättet att större och starkare är bättre. Fokuseringen på skaleffektivitet gör att vi ofta föredrar större apparater. Stora glödlampor ger mer lm/W än glödlampor med liten effekt och vi har utvecklat belysningssystem med armaturer för stora ljuskällor. Vi är vana vid att försöka få så mycket som möjligt för varje krona och försummar ofta betydelsen av att försöka få det bästa möjliga för varje krona.

Ett exempel på hur man brukar tänka är att många föredrar dammsugare som är märkta med en hög effekt, ett högt Watt-tal. Det finns dock risk att apparater som tillåts använda mycket el konstrueras på ett mindre förfinat sätt och att den större kraften därmed leder till mer slitage på dammsugarens delar (vilket alstrar damm) och högre ljudnivå. I och för sig möjliggör en stark motor stor sugeffekt och det kan vara bra med mycket ljus, t.ex. som dagsljus och läsljus för äldre. Det är dock inte säkert att en belysning med mer lm/W blir mer funktionell och en högre generell ljusnivå ger ofta sämre trivsel. Hög effekt kan leda till både oljud och oljus. Redan då Ljuskultur startade, 1928, noterade man att det är viktigt att skapa bra ljus. Tanksättet att större och starkare är bättre är dock inarbetat som en grund i många av det moderna samhällets nästan omedvetna uppfattningar. Detta är en del av en mer generell problematik.



Figur 8.
Illustration av upplevd relativ trivselkvalitet för glödlampa, lysrör och lysdiodarmatur.

Vår kommunikation är i stor utsträckning ”systematiskt förvriden” på ett sätt som vi, som deltar i processen, själva inte är klara över. Det försiggår sociala och ekonomiska processer över våra huvuden och bakom våra ryggar som vi inte är uppmärksamma på, och dessa processer bidrar till att prägla vår förståelsehorisont och därigenom vår upplevelse av varandra, oss själva och världen omkring oss. (Föllesdal 2001:155)

Utmaningen i att satsa på nytänkande

Psykologiskt sett är en stor del av vår tankeverksamhet näst intill omedveten. Det finns också en osäkerhet kring hur man kan arbeta med tvärvetenskaplig forskning och nya typer av affärsmodeller. Kunskapen om de etablerade arbetsformerna är tydligare. Figur 9 visar en möjlig analogi mellan det förmedvetna tänkandet och nyskapande teoribildning och affärsutveckling

För att verkligen våga satsa på nytänkande krävs det självförtroende och självkänsla. I dagens samhälle är det dock många aktörer som arbetar på att skapa osäkerhet som en metod för att få människor

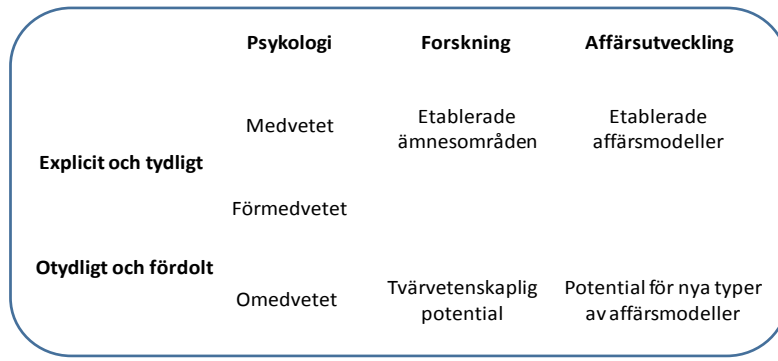
att köpa försäkringar, kompenserande produkter och att acceptera olika inskränkningar (Gardner 2009). Tendensen till att känna osäkerhet kan vara en anledning till att man blir skeptisk till att satsa på sådant som är implicit och känns mer osäkert. De flesta har kanske blivit mer benägna att satsa på sådant som är explicit och etablerat.

Eftersom vi vill verka för förnyelse är det extra betydelsefullt att skapa tydlighet. För att skapa intresse för nya lösningar krävs det att begreppsapparaten ger möjlighet att förklara fördelarna. Det är också angeläget att visa verkligt intresse för de nyskapande ansträngningar som görs. Bra uppfinnare, forskare och innovatörer har i och för sig en stark inre drivkraft för det de försöker åstadkomma. En del lever för att söka ny kunskap, nästan oberoende av hur det påverkar lönen och andras uppfattning om vad de gör. Det blir dock allt svårare att avvika från de gängse mönstren. Det är därför betydelsefullt att de personer som söker vägar till förnyelse kan känna tillit till att deras arbete med flervetenskapliga ”experiment” blir uppskattat.

Många svenskar är vana att förlita sig på formellt arrangerade former av säkerhet, t.ex. att man har en anställning inom en etablerad institution och att det finns tydliga former för meritering. Kreativt arbete för gränsöverskridande samarbete och förnyelse passar ofta inte in i den etablerade akademiska organisationens mål och arbetsformer. Det är därför angeläget att bedriva seriösa försök att verka för flervetenskapliga mål och förnyelse på ett sådant sätt att de medverkande känner trygghet i att deras ansträngningar och erfarenheter blir uppskattade, även i de fall då det konkreta förändringsförsöket misslyckas. Ansvaret för detta faller tillbaka på de personer som har anknytning till förnyelsearbetet.

För att kunna tydliggöra att de vunna erfarenheterna har ett generellt värde bör begreppsbildningen för det ljusrelaterade förnyelsearbetet knyta an till en bred referensram. Utöver betydelsen av att kunna prata om ljus på ett tydligt sätt bör begreppsbildningen öppna upp för tvärvetenskaplig dialog kring flervetenskapligt nytänkande och förnyelseinriktat samarbete.

De forskare som deltar i den flervetenskapliga och tillämpande kompetensuppbyggnaden får möjlighet att medverka i en kompletterande arbetsform, som inte är så vanlig inom den akademiska världen. Den ger erfarenhet av att medverka i integration och förnyelse. För att den formen av förmåga ska bli uppskattad i bredare kretsar, för samhället och i framtiden, är det betydelsefullt att knyta an till ett innovationsinriktat grundperspektiv. Den synsättsförändring vi bör ta oss an har relativt djupgående paradigmatiska och ontologiska inslag. Medicieffekten, skildrad av Johansson (2005), pekade på det stora utvecklingssprång som ägde rum under renässansen, just som en konsekvens av utbytet mellan olika kategorier av människor, konstnärer, musiker, arkitekter och andra vetenskapsmän m fl. Den tvärvetenskapliga plattformen, en mötesplats vi idag har goda förutsättningar att skapa, är en nödvändighet om vi ska kunna överskida gränserna för dagens specialkunskapsnischer, som riskerar att försnäva perspektivet.



Figur 9.
Tydliga och fördolda delar av tänkande och affärsmöjligheter.

Det är fortfarande väsentligt att upprätthålla och utveckla kopplingarna till etablerade vetenskapliga områden. För att kunna samverka med uppbyggnad av dynamisk kompetens- och affärsutveckling är det också viktigt att utveckla förmågan att ta nytta av t.ex. kvalitativ forskningsmetodik, fallstudier, aktionsforskning och hermeneutiska studier.

Systemtänkande och begreppsbildning för förnyelse

Vi lever i en påtagligt föränderlig värld. För att uppnå hållbar utveckling krävs det att olika delar och aspekter kan vidareutvecklas och förnyas på ett koherent sätt. Förändringarna inom organisationer måste samspela med hur de övergripande samhällssystemen förändras. Möjligheten att förnya de övergripande systemens funktionalitet är beroende av hur samhällets olika nivåer och del-system utvecklas och hur de olika delsystemens utvecklingsprocesser samspelar.

En grundläggande utmaning är att då ett förnyelseinriktat företag försöker komma igång med något som bryter de etablerade mönstren har det svårt att attrahera verkligt intresse. Det tenderar att vara svårt att engagera aktörer inom det akademiska systemet för att snabbt börja arbeta med nya typer av forskning och kompetensuppbyggnad, bland annat beroende på att det är svårt att finna finansiering och marknadssamarbete för sådant som är okänt. Då akademiker vill prova den verkliga samhällsnyttan av nya former av lösningar har de svårt att finna samarbetspartners. Då olika samhällsaktörer vill börja introducera en ny form av systemlösning har de svårt att finna samarbetspartners.

För att greppa den här problematiken är det många, t.ex. Vinnova, som arbetar med begreppet ”triple helix”, se Figur 10. Ambitionen är att klargöra hur akademiker, företag och samhällsaktörer kan samarbeta på mer givande sätt. Modellen förutsätter att det finns utvecklingsdrivande aktörer inom var och en av de tre sfärerna, och att dessa aktörer samverkar för att tillsammans möjliggöra förnyelse. Klöverbladet och den inre blågröna spiralen illustrerar att nytänkande och begrepps-bildning har en central roll i processen.

En anledning till att personer och företag har svårt att förnya sig själva ligger i att de saknar behövlig kunskap. Det finns också en risk för ett allvarligt förändringsmotstånd som baseras på att de som under någon tid är ledande inom ett område bygger upp en maktposition. Sådan makt kan användas för att bibehålla sin verksamhet och position, trots att förutsättningarna förändras. De som är övertygade om att de är världsbäst på något vill inte förändra det de gör. De företag och personer som är etablerade, duktiga och kontrollerar stora resurser riskerar att bli allvarliga utvecklingshinder (Christensen 1997).

För att åstadkomma förnyelse kan man å ena sidan styra fram förändring med regler och påverkande ”krafter” utifrån. För att på ett kreativt sätt skapa nya lösningar som går utöver ramarna för de kända och etablerade tankesätten krävs det också

Figur 10.
Trippelhelix för utvecklingssamarbete mellan företag, akademi och samhälle. (efter Karlsson 2010).

att man ger spelrum för inre kreativa utvecklingskrafter. Ett exempel på en teoretisk modell för att förklara grundfunktionen i ”levande” system är begreppet autopoetiska system, produktiva system som av sig själva reparerar, vidareutvecklar och på ett kreativt sätt förnyar sig själva (Maturana 1973). VSM-modellen (Beer 1972) är ett konkret exempel på en organisatorisk modell som beskriver en princip för hur ett livskraftigt system bör fungera.

Det finns många positiva erfarenheter av vad man kan uppnå genom att starta upp olika former av triple-helix-samarbeten. Resultaten bygger till en viktig del på engagemang. Det är inte tillräckligt att skapa en formell organisation för samarbete. Då man skapar en organisation, som får resurser och makt, finns det alltid risk att den organisationen efterhand fastnar i att till stor del försöka fortsätta med sin egen etablerade verksamhet. Även organisationer som har skapats för att möjliggöra triple-helix-samarbete kan tappa sin roll som dörröppnare för förnyelse (Karlsson m fl, 2010). Om ”samhället” förväntar sig att en sådan etablerad organisation skall vara en dörröppnare är det olyckligt om den aktuella organisationen inte lever upp till den roll som ”samhället” tror att den utför.

Verkligt genomgripande förnyelse kräver att man lär om, vilket förutsätter att man frigör sig från delar av sina tidigare tankesätt. Transformativt lärande är svårt, men det är essentiellt. Ur ett djupgående teoretiskt perspektiv kan man säga att allt verkligt nyskapande lärande förutsätter att man på något sätt ”misslyckas”. Om man lyckas med ett planerat utvecklingsförsök blir resultatet egentligen bara en bekräftelse av de tankesätt man hade då man planerade ”försöket”. Varje gång resultatet blir som man förutsåg ger det knappast några motiv för att förändra de mer grundläggande mönstren i det egna tänkandet (Mezirow 2000). Vi har här en pedagogisk aspekt av ljus, d.v.s. det är nödvändigt att konsumenten får så mycket kunskap att kommunikationen om ljusanvändande blir dubbelriktad mellan producent och konsument, en utveckling som just nu håller på att äga rum inom livsmedelsindustrin. Ett exempel på detta är när Skånemejerier höll på att utkonkurreras från Ica och Coop i Skåne, men att det stoppades när konsumenterna protesterade bl.a. på facebook. Har vi inte konsumenterna med oss kan vi inte förnya vår ljusvärld.

För att komma djupare in i den filosofiska kunskapsgrunden för arbete med utveckling och förnyelse kan det vara lämpligt att hämta inspiration från utvecklingsfilosofin (Hutcheon 1996). Teorin för systemtänkande innehåller beskrivningar av fallstudier, tankesätt och verktyg för hur man kan arbeta med analys, vidareutveckling och förnyelse av olika system (Hammond 2003).

Sambandet med forskning inom traditionella ämnesområden

Ljusgruppens bild av hur ett kompetenscentrum för ljus kan och bör fungera är inspirerat av hur man arbetar vid The Lighting Research Center (LRC) vid Rensselaer Polytechnic Institute, USA. LRC satsar på hög akademisk kompetens och trovärdighet och gör större delen av sin forskning i samarbete med användare av belysningsteknik.

Betydelsen av att välja ett användarperspektiv för ljussatsningen:

- Att söka kunskap om användarnas behov betyder i marknadstermer att man bygger grund för att kunna utnyttja vad kunderna egentligen borde vara beredda att betala för.
- Att ur ett samhällsperspektiv betyder en fokusering på användarnas behov och intressen att man verkar för funktionell belysning, folkhälsa och estetiskt tilltalande miljöer.

Ett kompetenscentrum kan tydliggöra varför det är så viktigt att bygga ingående kunskap om ljusets betydelse. De medverkande kan tillsammans bygga förståelse som gör att samhällsvärdet av deras olika kompetenser blir tydligare så att de därmed förbättrar möjligheten att bli uppskattade på de sätt det bör bli.

De föregående avsnitten beskriver motiv och utmaningar för flervetenskapligt och innovativt samarbete. För att företagens och samhällets kontakter med den akademiska världen skall verka för en hållbar utveckling är det grundläggande att knyta an till gedigen vetenskaplig kompetens. Det är grundläggande att integrera kunskap från olika områden och att aktivera den flervetenskapliga kunskapen i samspel med affärsutvecklare och andra samhällsutvecklande aktörer.

LU har en bra grund för flervetenskapliga satsningar genom att man har stor ämnesmässig bredd, satsar på gränsöverskridande samverkan och att det är korta avstånd mellan institutionerna. Skriften återkommer i de följande kapitlen till ljusrelaterade aspekter inom estetik, psykologi, medicin, biologi, teknik och fysik. Utöver dessa ämnesområden kan det också förbättra kunskapens hållbarhetsmässiga relevans att knyta an till miljövetenskap, humanekologi, sociologi, etnologi, filosofi och vetenskapsteoretiska ämnen.

Många forskare i Lund har medverkat i den avancerade företagsutvecklingen inom Ideon. För att kunna samspela med förnyelseinriktade samhällsprocesser är det viktigt att kunna belysa olika ekonomiska aspekter, såväl de traditionella företags- och nationalekonomiska, som nya synsätt inom miljö-, välfärds- och hälsoekonomi. LU Internationella Miljöinstitut (IIIEE) är en ledande aktör inom miljöekonomi med bas i företagsekonomi och med koppling till mänskliga och organisatoriska utvecklingsaspekter. LU har ett flertal framgångsrika centrumbildningar med inriktning på hållbar utveckling, t.ex. LUCSUS (LU centrum för studier av uthållig samhällsutveckling) och LUCRAM (LU centrum för riskanalys och riskmanagement).

Ideons form av koppling till innovativ affärsutveckling och de senare satsningarna på centrumbildningar för olika former av definierade kunskapsbehov för att begränsa miljörelaterade risker har efter hand spridit sig till allt fler universitet. För att komma vidare med att utveckla samspelet mellan samhällets kunskapsbehov och gedigen kunskapsutveckling instiftade Lunds universitet år 2009 det tvärvetenskapliga Pufendorfinstitutet.

Institutet utgör en öppen, kreativ, flervetenskaplig miljö för forskare inom och utom universitetet med mål att identifiera och studera några av dagens och framtidens stora problem och söka dess lösningar. Pufendorfinstitutet är en viktig länk i Lunds universitets långsiktiga strategiska plan att initiera och uppmuntra gränsöverskridande samverkan samt att på ett bättre sätt kunna dra nytta av samverkan med internationella experter.

Ljusgruppen har en ambition att medverka i näringslivets och samhällets utvecklingsprocesser och vi ser därför behov att knyta an till en gedigen vetenskapsfilosofisk grund och att förstå objektivitetsproblematiken och de etiska utmaningarna i medverka i utvecklingsarbete samtidigt som man gör vetenskapliga observationer, t.ex. genom aktionsforskning. För att kunna testa flervetenskapliga synsätt ser vi behov att använda kvalitativ forskningsmetodik. Vi räknar med att en del av forskningen kommer att bedrivas som deltagande observationer och fallstudier.

De följande kapitlen beskriver ljusrelaterade aspekter inom fysik, växtbiologi, synvetenskap, medicin psykologi, estetik och ett antal områden inom teknik, från halvledarfysik och tekniska system för att ta nytta av lysdioder fram till hur den nya tekniken kan nyttigöras genom förnyelse av design, byggande och installationsbranschen.

Ambitionen med skriften är att verka för flervetenskaplig och ”översättande”[11] forskning. Ett mål är att förbättra den ljusrelaterade samhällsnyttan av universitetens kunskap och forskningsprocesser. I andra riktningen är målet att identifiera samhällets ljusrelaterade kunskapsbehov och att ”översätta” sådana observationer till flervetenskaplig forskning och öppningar för ny grundläggande forskning.

[11] Termen *Translational research* fokuserar på att utveckla samspel mellan olika vetenskaper, lärprocesser i samhället, innovativ utveckling av tillämpningar och normbildningsprocesser (policymaking). LRC Renselear använder även termen *Transformative research* om sin arbetsform för att verka för förnyelse.

4
LJUSFORSKNING UR ETT FYSIKALISKT PERSPEKTIV

Det är ur ett fysikaliskt perspektiv naturligt att samla den ljusrelaterade forskningsfronten under några få rubriker. Det handlar dels om att skapa ljus, men också om att styra och manipulera ljus för olika syften. Studier av ljusets funktionella växelverkan utgör den tredje rubriken under vilken aktuell ljus-relaterad forskning i Lund kan sorteras.

Att skapa ljus

Som tidigare nämnts kommer utvecklingen av lysdioder att starkt bidra till framtidens belysningsforskning. I den forskningsverksamhet som idag bedrivs vid avdelningen för fasta tillståndets fysik är forskning kring s.k. nanotrådar och deras användning som effektiva lysdioder en viktig och framgångsrik gren. Nanotråden, som består av s.k. halvledarmaterial i olika kombinationer, kan p.g.a. sin litenhet uppfylla de extrema krav på materialrenhet och atomär precision som är en förutsättning för en energieffektivt fungerande lysdiod. Nanotrådens fysiska litenhet ger också uppenbara fördelar när det gäller möjligheter att skapa ljuskällor för mycket specifika ändamål.

Att styra och manipulera ljus

Under denna rubrik samlas forskningsfronten inom flera olika områden. Gemensamt för områdena är att man inom dessa utvecklat avancerad teknik, från optik till datoralgoritmer, i syfte att kontrollera ljus. Det gäller styrning av ljus från extrema ljuskällor, men också manipulation av ljus t.ex. i samband med matematisk bildanalys.

Synkrotronljus är det ljus, eller snarare den elektromagnetiska strålning, som uppstår då laddade partiklar, t.ex. elektroner accelereras. Utveckling av avancerad optik och metoder för anpassning av synkrotronstrålningen för användning vid t.ex. materialvetenskapliga studier sker idag vid det nationella laboratoriet MAX-lab i Lund. Planeringen och konstruktionen, av nästa generations synkrotronljuskälla MAX IV visar att forskningsfronten inom detta område finns i Lund.

Vid MAX-lab pågår också, i samarbete med forskare från gruppen för s.k. attosekundfysik[12] vid fysiska institutionen, forskning kring utveckling av en s.k. fri-elektron laser. Karakteristiskt för laserljus är att det är intensivt och att ljuset består av långa, sammanhängande vågor. Normalt sett uppstår lasereffekt bara i vissa specifika atomslag och under mycket speciella förhållanden. Det innebär att det mesta laserljus som skapas har några få, bestämda våglängder. I en frielektron laser skapas laserverkan genom manipulation av elektroner som färdas med mycket hög hastighet genom en accelerator. Ljuset är därför helt frikopplat från atomslag och kan därmed ha i stort sett vilken våglängd som helst.

Gruppen för attosekundfysik har också framgångsrikt utvecklat en avancerad teknik för generering av extremt korta pulser av högintensivt laserljus. Precisionen med vilken man kan producera och repetera ljuspulserna möjliggör t.ex. tidsupplösta studier av oerhört snabba förlopp. Gruppen har bl.a. lyckats avbilda hur en elektron

[12] En attosekund är 1. 10^{-18} sekunder, en miljarddel av en miljarddels sekund.

rör sig, något som aldrig tidigare gjorts med direkta metoder.

En av ”det stora universitetets” främsta fördelar är närheten till fruktbara möten forskargrupper emellan. Ett exempel på detta inom ljusforskningen är samarbetet mellan gruppen i matematisk bildanalys och forskarna inom Biologicentrums ”Vision Group”. Matematikernas arbete inom bildanalys och datorns ”seende” växelverkar framgångsrikt med biologernas forskning kring olika organismers seende.

Ljusets funktionella växelverkan

Under den tredje och sista rubriken samlas ljusforskning vars syfte är att utveckla tekniker som optimerar ljusets funktionella växelverkan. Dels gäller det forskning där optimering görs för att uppnå hög funktionalitet i sig såsom t. ex solcellsforskning. Det handlar också om forskning där den optimerade funktionaliteten leder till förståelse som i nästa led kan användas för teknikutveckling, t.ex. laserbaserad förbränningsdiagnostik för utveckling av framtidens förbränningsmotorer.

Samma egenskaper som gör nanotråden ideal som ljusskapare i lysdioder gör nanotråden intressant som aktiv komponent i den omvända processen, d.v.s. i konstruktionen av framtidens solceller. Här strävar forskningen mot att uppnå optimal funktionalitet genom framtagning av den ideala nanotråden för just denna applikation.

På liknande sätt strävar forskningen inom forskargruppen i biofotonik vid avdelningen för atomfysik mot funktionalitet. Här används lasrar i kombination med sensibiliserande molekyler för foto-dynamisk cancerterapi. Forskningens mål är optimering av växelverkan mellan laserljus, sensibiliseringsmaterial och vävnad för att uppnå största möjliga effekt.

På samma sätt som ljuset från en stjärna avslöjar stjärnans temperatur och grundämnesförekomst, innehåller ljuset från en förbränningsprocess denna information. Passiva studier av utsänt ljus räcker för övergripande diagnostik, men för studier av dynamiska processer och test av teoretiska modeller för förbränningskinetik krävs studier av den direkta växelverkan mellan ljus och enskilda molekyler. Avdelningen för förbränningsfysik arbetar med detaljerade studier av förbränningskinetik med hjälp av laserbaserade metoder. Forskningens mål är att kunskap på detaljnivå ska kunna användas för att effektivisera förbränningsprocessen i framtidens motorer.

Vid avdelningen för synkrotronljusfysik bedrivs forskning som spänner över ett stort område; från exempelvis studier av tunna filmer för batteritillverkning, till studier av proteiners struktur och funktion. Tillgången till synkrotronljus möjliggör detaljerade undersökningar av växelverkan på atomär/molekylär nivå.

Inom det s.k. nanometerkonsortiet[13] vid Lunds universitet bedrivs omfattande forskning där ljus används för att förstå och optimera funktionen inte bara hos nanotrådar utan också hos andra material på nanoskalan. Ett stort område är artificiell fotosyntes i syfte att skapa högeffektiva energiomvandlare. Ett annat spännande exempel är strukturering av material på en skala mindre än ljusets våglängd. Sådana material, som kallas metamaterial, kan ges egenskaper som bäst beskrivs med hjälp av negativa brytningsindex. Ett metamaterial är för det mänskliga ögat osynligt. Förståelse av ett materials egenskaper på denna nivå är förutsättningen för framtida materialutveckling, en utveckling som i sin tur kommer att ha stor teknisk betydelse.

Ljusforskningen ur ett fysikaliskt perspektiv är så omfattande och rik inom Lunds universitet att de aktiviteter som nämns ovan bara utgör ett axplock därav.

[13] Se www.nano.lth.se

5
LJUS UR ETT BIOLOGISKT PERSPEKTIV

Växter och ljus

Växternas fotosyntes

Förmågan att fotosyntetisera med syrgas som ”biprodukt” finns hos växter, alger och cyanobakterier, vilka utgör huvuddelen av biomassan på jorden. I fotosyntesen omvandlas ljusenergi till kemisk energi. Den kemiska energin gör det möjligt att binda in och omvandla luftens koldioxid till kolhydrater. Fotosyntesen är en förutsättning för nästan allt liv, eftersom kolhydrater bildas i överskott och därför kan nyttjas som energikälla av organismer som inte fotosyntetiserar. Elektronerna som behövs för att ge kemisk energi tas från vatten, och syrgas bildas. Fotosyntesen är vanligtvis baserad på våglängder mellan 350 nm och 750 nm.

Fotosynteskapaciteten har varit en drivande faktor under evolutionen. Delar av fotosyntesen är förvånansvärt lika mellan en högre växt och en cyanobakterie. Fotosyntesapparaten är intrimmad för att ge största möjliga utbyte och flexibilitet. Klorofyller och andra pigment ser till att ljusenergi kan uppfångas och omvandlas till kemisk energi även när det är skuggigt eller när ljuset inte är helt vitt, som för växter under ett bladverk eller alger i havet. Klorofyller har två absorptionstoppar, en i blått och en i rött ljus, medan de knappast absorberar något grönt ljus – det är därför växterna är gröna.

Det verksamma spektrumet breddas av en grupp av organiska, fettlösliga ämnen, karotenoider, (samt olika ljusuppfångande fykobiliner, ljusuppfångande molekyler, i rödalger och cyanobakterier). Det är energin motsvarande absorptionen av rött ljus av klorofyllet som omvandlas till kemisk energi, medan energiskillnaden mellan rött och blått ljus blir till värme.

I eukaryota organismer sker fotosyntesen i kloroplasterna (Taiz & Zeiger 2010). Fotosyntesapparaten är lokaliserad till membranblåsor, tylakoider, i kloroplasternas inre. Två fotosystem och mellanliggande proteinkomplex av elektronbärare arbetar i serie. Centralt i varje fotosystem sitter ett reaktionscentrum som är relativt likartat i olika organismer. Större variation finns i de omkringliggande pigmenten som genom resonans för energin till det centrala klorofyllet. Storleken på dessa komplex av hjälppigment varierar för att optimera kanaliseringen av ljus in till reaktionscentrumet, så att det kan utnyttja svagt ljus men skyddas mot för starkt ljus. Slutprodukten i elektrontransportkedjan på tylakoidmembranet är NADPH, en molekyl som sedan används i själva reduktionsprocessen i Calvincykeln. Detta är dock inte den enda produkten. Flödet av elektroner ger ett flöde av protoner in i tylakoidmembran-blåsornas inre. En protonassymetri uppstår vilket ger en drivkraft för bildning av ATP, en molekyl som fungerar som ’energivaluta’ för att driva många biokemiska processer exempelvis i Calvincykeln.

När ljus träffar växten på morgonen aktiveras flera av de enzym som ingår i processerna där koldioxid reduceras till kolhydrat (den så kallade Calvincykeln[14]). De primära reducerade produkterna av ljusreaktionen verkar signalerande, framförallt genom att anpassa kloroplastens metaboliska enzymer till olika aktivitet i ljus och mörker.

[14] Del av fotosyntesen, där koldioxid binds och omvandlas till kolhydrater.

Regleringen av fotosyntesen sker även på mer makroskopiska nivåer; kloroplasterna kan orienteras, bladen kan ställa in sig och hela växten kan växa i relation till infallande ljus. Dessa senare processer styrs inte av fotosyntespigmenten utan av en rad signalerande fotoreceptorer. Sådana fotoreceptorer styr också öppningsgraden hos klyvöppningarna som reglerar gasutbytet mellan blad och luft.

Fotoreceptorer som signalförmedlare

Växter behöver ljus för att fullfölja sin livscykel, inte bara för fotosyntesen, utan också för en lång rad processer som frögroning, orientering i relation till ljuset, öppning av klyvöppningar, längdtillväxt, blomning mm. (Björn 2008). För detta har flera typer av signalerande fotoreceptorer utvecklats och de flesta aktiveras antingen av långvågigt ultraviolett till blått ljus eller av rött/mörkrött ljus. Fotoreceptorerna behöver oftast mycket svagare ljus för att aktiveras än vad som behövs för fotosyntesen.

Fototropinerna är proteinbundna blåljusabsorberande pigment inblandade i ganska snabba processer som vanligtvis inbegriper rörelser, exempelvis att styra växtens tillväxt mot ljuskällan, kloroplaströrelser, bladrörelser, öppning av klyvöppningar, mm. Kryptokromerna, som finns i både växter och djur är också blåljusabsorberande proteinbundna pigment med ungefär samma absorptionsmaxima som fototropinerna. De liknar i sin struktur fotolyaser, d.v.s. DNA-reparationsenzym, men kan inte reparera DNA. Kryptokromer är viktiga i inställningen av den biologiska klockan samt ett flertal andra processer som enzymsyntes, hämning av längdtillväxt mm. Den tredje stora gruppen av pigment i växten är fytokromerna. Dessa är inblandande i många olika processer som frögroning, blomning, stamsträckning, mm. Fytokromerna är fotoreversibla; när den rödabsorberande formen absorberar rött ljus omvandlas den till den mörkrödabsorberande, och omvänt. Det är den mörkrödabsorberande formen som är aktiv. Balansen mellan de två formerna styrs av färgen på ljuset. Ljus som tränger ner till växter som står under ett bladverk blir anrikat på de våglängder som klorofyll inte kan absorbera, d.v.s. grönt och mörkrött. Det mörkröda ljuset ser till att skjuta över fytokromet i den inaktiva formen. Växten uppfattar detta som skugga och beroende på vad det är för växt, så ökar den tillväxttakten eller inte. Utanför dessa typer hittas fortfarande nya fotoreceptorer, t.ex. Zeitlupe som nyligen visades vara en blåljusreceptor som interagerar med den biologiska klockan (Kim et al. 2007).

Ljus-receptorerna ger växten större möjlighet att anpassa sig efter rådande ljusomständigheter och utveckla liv i nya nischer. Optimeringen innebär att inte slösa på resurser, exempelvis gäller det att blomma vid rätt tid så att fröna hinner bli klara, liksom att ha klyvöppningarna öppna så fort som möjligt på morgonen för att släppa in koldioxid innan det blir så varmt och att det är risk för vattenförluster. Den rådande high-impact forskningsfronten är fokuserad på att utreda molekylära komponenter och system i ljus-signalering och – informations-processning (t.ex. de Lucas et al., 2008; Lin et al., 2007; Liu et al., 2008). Detta lägger grunder för att förstå växternas reaktioner på ljus, men är inte direkt applicerbart på de uppkomna möjligheterna att använda nya spektralt kontrollerade ljuskällor för att utveckla odlingssystem.

Växtodling med artificiellt ljus

Människan har sedan yngre stenåldern odlat växter för att föda sig. Man har förlitat sig på naturligt ljus från solen och odlat utomhus. I mitten av 1600-talet började man i Sverige odla i glashus för att kunna härbärgera köldkänsliga växter som fikon och citrusfrukter. Odling i glashus tog dock först fart och fick en större kommersiell betydelse när man också kompletterade med extra ljus, för att utsträcka odlingssäsongen. Detta ställer krav på belysningen och lampornas spektrala avgivande, speciellt om solljuset inte är så starkt. De behov som växten har av ljus stämmer dåligt med vad lampor ger. Dessutom har man kommersiellt olika sorters behov, det handlar inte alltid om högsta produktion

i form av biomassa, utan kanske ibland snarare om produktens färg, form och smak. Man har ganska länge använt olika sätt att göra dagen kortare eller längre, med dukar eller tilläggsbelysning (för att få höstväxter som krysantemum att blomma tidigare), men annars inte varierat ljuset särskilt mycket.
I växthus där man visar upp blommor används metallhalidlampor. Vanliga ljuskällor i ett växthus för odling av grönsaker är högtrycksnatrium (HPS), vilka i och för sig ger ett starkt ljus men där spektrumet inte är avpassat till klorofyllets absorption. HPS ger huvudsakligen gult ljus. Detta är ineffektivt för fotosyntesen, och energikostnaderna är därför stora. Belysning med LED har blivit ett attraktivt alternativ till de nu använda ljuskällorna eftersom dess ljusspektrum kan anpassas till växtens behov. Genom att balansera röda och blå LEDs kan man hitta en ljusblandning som är gynnsam för tillväxten på ett mera energisnålt sätt. Investeringskostnaderna för LED är dock fortfarande stora. Det känns också ofta säkrare att belysa med konventionell utrustning eftersom det där finns lång erfarenhet av kvalitén på produkterna, d.v.s. växterna. Användandet av LED går därför fortfarande trögt. Många uppfattar också att växterna ser mindre hälsosamma ut i det kalla ljuset från LED-belysningen.

Kompetensen i Lund och samhällsnyttan

Forskningen inom växtbiologi vid Lunds Universitet är sedan länge fokuserad på växternas energi- omsättning och hur denna påverkas av olika abiotiska faktorer, exempelvis ljus. Ett annat huvud-intresse rör hur växterna svarar på angrepp av mikroorganismer. Vi har därför lång erfarenhet såväl av att odla växter under olika betingelser som att analysera deras funktionella status på molekylär, cellulär och helväxtnivå. Vi intresserade oss tidigt för vilken roll ljus har i utvecklingen, både beträffande effekt som kvalitet, där gruppen kring dåvarande professor Björn varit mycket aktiv, speciellt beträffande skadlig UVstrålning. Fotobiologiska frågeställningar har även engagerat professor Susanne Widell. De senare åren har forskningen kring ljusberoende fått ny fart, genom att professor Allan Rasmusson hittat ljusberoende reglering av genuttryck kopplade till växternas energihushållning. Dock har som helhet verksamheten inom ljusområdet varit begränsad under senare år. Intressant för utveckling av olika belysningssystem är att vi (främst A. Rasmusson), har erfarenhet av kopplingen mellan energiomsättning och kvävemetabolism. Vid framtagandet av nya belysningsmodeller är det möjligt att näringssammansättningen i substratet för växterna behöver modifieras för att få den önskade produkten att vara tilltalande.

Lund har kunskap om LED-baserad belysning för växtodling

Forskargrupperna i växtbiologi i Lund (kring Susanne Widell och Allan Rasmusson) arbetar med molekylärt systemtänkande och studerar hur olika faktorer påverkar tillväxt och utveckling. Gruppen har lång erfarenhet av att odla växter under olika betingelser och samarbetar med forskare i Alnarp. En aspekt av hur ljus påverkar hälsan hos växterna är halten reaktiva syreföreningar i växterna och hur dessa tas om hand. De reaktiva syreföreningarna indikerar stress och obalans, vilket olika växter är olika bra att hantera. De reaktiva syreföreningarna påverkar därför produktens kvalité. Utvecklingen av olika LED-baserade växtodlingssystem är i ett intensivt skede, där man framförallt fokuserat på att skapa fotosyntetiskt verksamt ljus som kräver mindre energi. Mindre uppmärksamhet har fästs vid att olika växter använder ljus i utvecklingen av kommersiellt intressanta kvalitéer som smakämnen och färg (inte bara biomassa). Vår kunskap om ljusets roll i bildningen av dylika ämnen är en viktig utgångspunkt i design av kombinationer av LED för högsta produktkvalité. Vår erfarenhet av växtodling och växternas basala ämnesomsättning är också en förutsättning. Sett ur ett större perspektiv kan växterna också utgöra modellsystem i framtagandet av olika belysningar eftersom färre parametrar är inblandade i deras reaktion på ljus än vad gäller människan och andra djur.

Människors och djurs synsinne

Synsinnet är en produkt av biologisk evolution

Djuren utnyttjar ljus för att styra sitt beteende och för att styra många av kroppens inre funktioner. Kunskap om hur naturligt och artificiellt ljus via synsinnet påverkar djur och människor är av avgörande och uppenbar betydelse för utvecklingen av framtidens ljuskällor och strategier för ljussättning.

Ögon finns hos nästan alla djurgrupper från maneter till fåglar och däggdjur. Men alla djur ser inte världen på samma sätt. Ögon har utvecklats till att fylla olika uppgifter i olika hörn av djurvärlden. Trots detta är de principiella likheterna mellan människors och djurs synsinne mycket stora, och man kan med fördel studera oliks djurs synsinne för att förstå vårt eget (Land & Nilsson 2002). Jämförande studier av djurens synsinne visar med stor tydlighet att naturliga ljusmiljöer och den visuella information de innehåller utnyttjas i grunden på samma sätt hos nästan alla djur (Lythgoe 1979). Det är ytterst få aspekter, om ens några, som är unika för människans synsinne (Wandell 1995).

De djurgrupper som har utvecklat ett avancerat synsinne är ryggradsdjuren, till vilka vi själva hör, leddjuren, som t.ex. insekterna, och blötdjuren, med bläckfiskar som framträdande exempel. Från dessa tre djurgrupper känner vi idag till åtta grundtyper av ögon som grovt kan delas in i linsögon, fasettögon och spegelögon. Varje typ använder sin egen kombination av linser, speglar och ljusledare för att föra över information från omgivningen till nervsystemet. Även ögon av samma grundtyp ser lite olika ut hos olika djurarter beroende på deras skilda behov av visuell information. Alla delar av ögat, från optiken till de ljuskänsliga cellerna, är hos varje djurart anpassade efter dess speciella behov. Även nervsystemet är hos varje art anpassat för att ta hand om just den syninformation som arten har bäst nytta av.

Synsinnet hos alla djur, inklusive vårt eget, är produkter av biologisk evolution. Därför är synsinnet oerhört väl anpassat för de ljusmiljöer och den visuella information som djuren under årmiljonerna har utvecklats i. Människa har med artificiella ljuskällor påverkat ljusmiljöerna, men denna påverkan har blivit omfattande först de senaste hundra åren. För evolution är hundra år en kort tid, och det betyder att både djur och människor fortfarande har synsinnet anpassat för de naturliga ljusmiljöer som varit rådande under de senaste årmiljonerna. Belysning på vägar och gator, stadsbelysning och inomhusbelysning är främmande miljöer som vi som biologiska varelser inte är optimalt anpassade för.

Biologisk synforskning i Lund

Inom forskningsmiljön ”Lund Vision Group” eller ”syngruppen” arbetar fem separata forskargrupper ledda av Prof. Dan-E. Nilsson, Prof. Eric Warrant, Prof. Almut Kelber, Prof. Ronald Kröger och Dr. Marie Dacke. Totalt omfattar syngruppen 25-30 personer som alla arbetar med synsinnet hos olika djur. Forskningen är inriktad på hur ögon och relevanta delar av nervsystemet anpassats till djurens olika livsstilar och miljöer, samt hur dessa anpassningar uppkommit under evolutionen. De olika forskningsprojekten undersöker allt från manetögon till människoögon, och arbetar med allt från molekylärbiologi till djurens beteende. Syngruppen är en multidisciplinär och internationellt ledande forskningsmiljö där evolutionsbiologer, neurobiologer, teoretiska fysiker och matematiker samarbetar inom olika projekt.

En mängd olika metoder och tekniker används för studier av djurens synsinne. Bl.a. studeras ögonens optiska egenskaper, samt syncellernas och nervsystemets elektriska signaler. Även visuellt styrda beteenden undersöks både i naturliga miljöer och i kontrollerade laboratorieförsök. För att förstå synsystemens anpassningar hos olika djurarter undersöks även de naturliga ljusmiljöerna med avseende på intensitetens fördelning och ljusets informationsinnehåll i olika delar av naturliga scener.

En växande del av forskningen utgörs av teoretisk modellering för att nå en kvantitativt korrekt förståelse av hur djurens synsinne fungerar. Synvetarna ordnade tillsammans med växtbiologerna 2007 ett symposium kring organismers 'synsinne' vid en Crafoordkonferens i Lund.

Huvuddelen av syngruppens verksamhet kan beskrivas som grundforskning med mål att förstå grundläggande principer för hur ögon och nervsystem fungerar och hur de uppkommit. På grund av ämnets natur skapar denna grundforskning dock talrika möjligheter för tillämpad forskning inom medicin och teknik. Speciellt inom tekniker som digitalkameror och bildskärmar, samt inom robotik har syngruppen startat tillämpade projekt som resulterat i flera innovationspriser, åtskilliga patent och även skapat ett nytt företag. Under separata rubriker beskrivs nedan kortfattat några av syngruppens forskningsprojekt som har relevans för utvecklingen av nya ljuskällor och nya typer av belysning.

Närsynthet och blått ljus

Närsynthet uppkommer genom att ögat växer sig för långt, så att den avslappade linsen fokuserar skarpt en liten bit framför näthinnan. Det har visat sig att ögats längdtillväxt är styrd av hur mycket vi anstränger oss för att ställa in linsen för syn på nära håll. Speciellt gäller detta de första 20 åren i livet. Det är alltså ingen myt att mycket bokläsning så småningom resulterar i behov av glasögon. Syngruppen har visat att ögats oförmåga att fokusera alla våglängder i samma bildplan kan utnyttjas för att förebygga närsynthet. I ögat bryts blått ljus aningen mer än rött och grönt, vilket gör att vi i blått ljus redan ser skarpt på nära håll utan att ställa om linsen. Det är därför möjligt att förebygga närsynthet hos barn genom att använda ljusblått papper eller blåtonad belysning vid bokläsning.

Nattseende

Människor och djur kan se bra under mycket skiftande ljusförhållanden. En stjärnljus natt är ljuset ungefär 100 miljoner gånger svagare än under en solig dag. Trots detta har vi fortfarande så god synförmåga i stjärnljus att vi kan röra oss utan att gå in i varandra eller kollidera med större föremål. Andra djur har ännu bättre förmåga att anpassa synen till svagt ljus på natten eller i djuphavet. Moderna digitalkameror och videokameror har betydligt sämre förmåga att anpassa sig till så stora skillnader i ljusintensitet och att klara av svagt ljus. Syngruppen har under lång tid undersökt de mekanismer som gör att djurens syn kan fungera så bra i svagt ljus. Detta har nu resulterat i tillämpningar som kan användas i digitalkameror, och resultaten håller på att tas i bruk i system för förarassistans i moderna bilar (Toyota). Kunskapen om hur djurens ögon anpassar sig till svagt ljus kan också utnyttjas för att utforma energisnål svag belysning utan att synförmågan blir lidande.

Djurens färgseende

Även om vi lätt uppfattar färger som objektiva egenskaper, är vår färguppfattning helt beroende på vår uppsättning av tre olika typer av tappceller i näthinnan. Andra djur har färgseende som kan vara både sämre och bättre än människans. De flesta andra däggdjur, som t.ex. hund, katt, häst och ko har ett enklare färgseende som bygger på endast två olika sorters tappceller i näthinnan. Det betyder att dessa djur uppfattar färger på ett annat sätt än vi, och att de inte kan skilja på så många olika nyanser som vi kan. Åter andra djur som t.ex. fåglar och fjärilar har ett färgseende som är betydligt bättre än vårt eget. Dessa djur kan lätt skilja på färger som för ett människoöga ter sig precis lika. Syngruppen undersöker färgseende hos bl.a. insekter och fåglar, och resultaten kan användas för att förutsäga vad andra djur kan se med hjälp av sitt färgseende. För djur som hålls inomhus och för pollinerande insekter i växthusodling är kunskapen om deras färgseende viktig för att kunna skapa ändamålsenlig belysning.

Navigation med hjälp av syn

Insekter använder synen för att navigera i visuellt komplexa miljöer och för att klara av kontrollerade landningar på olika objekt eller underlag. På goda grunder kan man anta att insekterna använder samma grundläggande principer som vi gör med vårt mänskliga synsinne. Insekter är dock lättare att undersöka, och deras synförmåga är imponerande trots att både ögon och hjärna är oerhört mycket mindre än hos oss själva. De viktiga kunskaper som syngruppen genererar om insekters visuellt styrda beteenden är dels karaktärisering av den information som hjärnan extraherar från bilden i ögat, och dels kunskapen om hur den visuella informationen processas i nervsystemet. Båda dessa kunskapsområden är nödvändiga för att förstå vad som är avgörande för vår visuella uppfattningsförmåga, och hur vi skall belysa vår omvärld för att underlätta god visuell uppfattningsförmåga.

Ljusmiljöns betydelse

I ett nystartat projekt utvecklar syngruppen metoder för att systematiskt undersöka ljusomfång och visuell information i naturliga miljöer. Skillnaderna mellan ljusmiljön för en djuphavsbläckfisk, en snabbflygande insekt och ett gräsätande däggdjur är betydande, och projektet avser att klargöra de generella principer som gäller för att bäst anpassa synsystemen till de olika ljusmiljöerna. Projektet kan enkelt utvidgas till att jämföra de för människan naturliga ljusmiljöerna med våra artificiella ljusmiljöer både inom- och utomhus. Med LED-belysning ges möjligheter att påverka både intensitetsfördelning och färgsammansättning så att ljussättningen av artificiella miljöer på relevanta punkter liknar de naturliga miljöerna som vårt synsinne genom evolutionen är anpassat för. Potentialen för att med ny belysningsteknik öka både välbefinnande och visuella prestationer är stor och uppenbar. Den kunskap och de metoder som behövs för att realisera en sådan teknikutveckling finns redan på plats i Lund.

Biomimetik

Syngruppens långa erfarenhet av forskning om synen hos de mest märkliga djur har gång på gång avslöjat häpnadsväckande biologiska mekanismer och funktioner som lätt kan omsättas i tekniska applikationer. Biologiska system har ofta löst problemen på oväntade och geniala sätt. Eftersom djurens synsystem dessutom är utvecklade i evolutionär konkurrens är de både effektiva och robusta. Sådana egenskaper är självklart eftersträvansvärda i tekniska applikationer. Nattsynsprojektet som beskrivits ovan är ett exempel på en biomimetisk tillämpning som slagit väl ut. Tidigare okända optiska system i olika fasettögon som syngruppen beskrivit i flera arbeten i tidskriften Nature är utvecklade för att effektivt samla in ljus till ögats ljuskänsliga celler, men ljusets väg kan reverseras och principerna fungerar lika bra för konstruktion av mikrooptik integrerad i lysdioder. Optiska system i olika djurs ögon har därför god potential att kunna kopieras för användning i framtidens ljuskällor.

6
LJUS SOM MEDICINSKT FENOMEN

Frågeställning och metodik

Syftet med denna sammanställning är att sammanfatta aktuell forskning kring hur ljus påverkar hälsan. Kapitlet går igenom direkta ljuseffekter och hur de påverkar temperatur och klimat, men även D-vitaminberoende sjukdomar samt hud- och ögonsjukdomar. Avsnittets syfte är att ge kunskap om det naturliga ljusets effekter då denna kunskap även kan användas i vår artificiella miljö. Därnäst följer ett axplock om indirekta effekter via 3e receptorn, (se fotnot 1, s. 14), på de endokrina systemen, immunsystemet, cirkulationsorganen och centrala nervsystemet.

Bakgrund

Ursprungligen var människan aktiv under den ljusa delen av dygnet. Därefter kom elden som utsträckte den aktiva tiden något. Under den senaste tidsperioden, ca 100 år, har vi haft möjlighet att ändra vårt sätt att leva radikalt genom tillkomsten av elektriskt ljus. Detta innebär att vi måste ta hänsyn till multipla aspekter vid en bedömning av ljusets effekter på hälsan.

Solen ger värme och ljus, både synligt och UV-strålning. Detta leder till direkta effekter som bör beaktas, dels därför att det naturliga ljuset är enormt viktigt för livet på jorden och dels då en del av dessa effekter också kan uppnås respektive förhindras genom artificiell belysning respektive skyddsåtgärder.

Genom ljusets signalering via ögats tredje receptor och åtföljande neurologiska, endokrina och immunologiska effekter påverkas hela organismen på flera olika sätt. Tidigare har enbart solen ansvarat för denna effekt, men vår nyvunna kunskap om ljusets effekter via ögat medför att vi också kan påverka dessa system. Ett exempel är ljusbehandling vid årstidsberoende depression[15].

Tillgången på elektriskt ljus, oavsett källa, påverkar också vårt sätt att leva. Uppkomsten av det ständigt öppna servicesamhället är en konsekvens av detta. Detta leder i sin tur till andra arbetstider där skiftarbete har en dokumenterat hälsoskadlig effekt. Bland annat ökar risken för hjärtkärl-sjukdomar (Haupt 2008) och cancer (Moser 2006). Samtidigt som utsträckta arbetstider och arbete på andra tider än bara dagtid kan påverka vår hälsa negativt kan tillgången till ljus både ge ett öppnare samhälle och möjliggöra ljusbaserade både förebyggande och behandlingsinsatser. Flera organsystem kan därigenom påverkas i en gynnsam riktning.

Direkta ljuseffekter

Växthuseffekten innebär att långvågig strålning p.g.a. s.k. växthusgaser hindras att lämna jordens atmosfär vilket anses bidra till ökad värme och mer nederbörd, men knappast någon skillnad i ljus-påverkan på levande organismer. Däremot har uttunningen av ozonet och uppkomsten av ozonhål en direkt påverkan på människan genom att det släpps igenom mer UV strålning som påverkar hud och ögon.

Värmen utgör en riskfaktor som huvudsakligen drabbar äldre (Bouchama 2007), barn (Ebi 2007) och andra som har svårt att ta hand om sig själva på ett adekvat sätt. Många värmeberoende

[15] SAD – seasonal affective disorder

sjukdomar kan också riskera att öka i vår del av världen om solstrålningens effekt ökar, som t.ex. borrelia från fästingar med flera. Genom att bygga bostäder på ett sådant sätt att man undviker direkt solinstrålning i de rum där man vistas mest på eftermiddagarna kan man undvika att det blir alltför varmt. Växtlighet utgör också en viktig faktor som skydd mot direkt solstrålning. Som exempel på hur viktig växtligheten kan vara kan vi tänka oss ett träd mitt ute i öknen. För en person som befinner sig där utgör trädets existens en fråga om liv och död.

D-vitamin

För en adekvat nivå av D-vitamin behövs ett tillräckligt intag i kosten men även exponering för sol-ljus, egentligen UV-B-strålning, som aktiverar inaktivt D-vitamin. Brist bedöms kunna bidra till benskörhet, vilket är välkänt. Förekomsten av benskörhet är högst i vår del av världen, där vi har otillräckligt med solljus under den mörka delen av året.

Även risken för cancer tycks öka av brist på D-vitamin, speciellt bröst-, tjocktarms-, prostatacancer och lymfom. Det metabola syndromet, d.v.s. diabetes, högt blodtryck, höga blodfetter och övervikt är vanligt i Västvärlden och drabbar i dag ca 10%+ av den svenska befolkningen. Både socker-reglering och blodtrycksnivå påverkas av D-vitaminstatus och en rubbning av dessa parametrar ökar i sin tur risken för hjärtinfarkt och slaganfall. Autoimmuna tillstånd som MS, RA och psoriasis verkar påverkas gynnsamt av D-vitamin och sannolikt påverkas även immunsystemet i allmänhet. Depression verkar också korrelera med lägre D-vitaminnivåer. Figur 11 visar totala ohälso-tal per län för perioden januari-oktober 2005.

Hud- och ögonsjukdomar

Huden är en kontaktyta mot omvärlden och den påverkas både gynnsamt och ogynnsamt av solljus. Förekomsten av hudcancer som maligna melanom har ökat p.g.a. hål i ozonskiktet och ökad solning på fel sätt (Abbasi 2004), medan t.ex. psoriasis förbättras av solbehandling (Menter 2010).

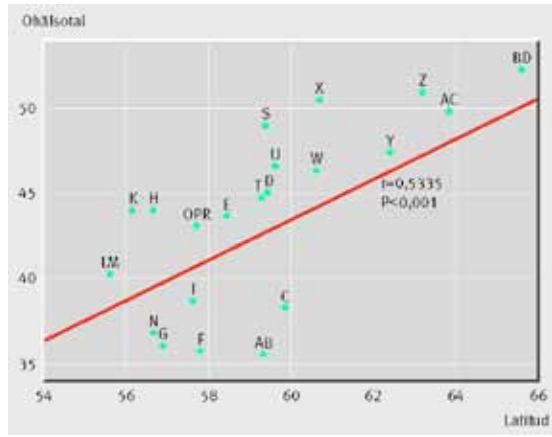
Ögonen exponeras också för solljuset. Snöblindhet är ett exempel på en känd akut effekt medan katarakt, grå starr, utgör exempel på en sjukdom som kan uppstå p.g.a. lång tids exponering för UV-ljus (Asbell 2005).

Indirekta ljuseffekter via 3e receptorn

Berson beskrev förekomsten av en tredje receptor, (se fotnot 1, s. 14), i ögat utöver stavar och tappar. Denna receptor reagerar på ljus av en viss våglängd och påverkar vår naturliga rytm för sömn och vakenhet (Berson 2002). Kunskapen om 3e receptorn bidrar till förståelsen av hur vår biologiska klocka regleras och hur andra hormonella system kan påverkas när vi utsätts för solljus, exempelvis på morgonen. Den rytm som 3e receptorn reglerar ger i sin tur konsekvenser för organismen som helhet både vad beträffar fysiologiska rytmer som sömn – vakenhet och sjukdomsförlopp som t.ex. risken för hjärtkärlsjukdom mm.

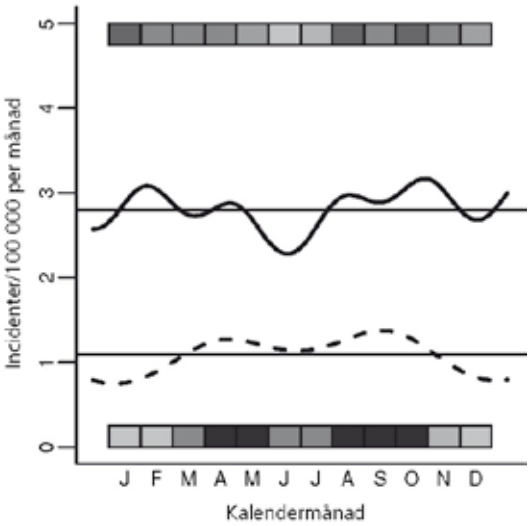
Endokrina och immunologiska reglersystem/autoimmunitet

Vid diabetes typ 1 angriper det egna immunförsvaret felaktigt de insulinframställande betacellerna i



Figur 11.
Försäkringskassans ohälsotal som funktion av latitud för olika län (Humble 2007). Återgiven efter tillstånd av författaren.

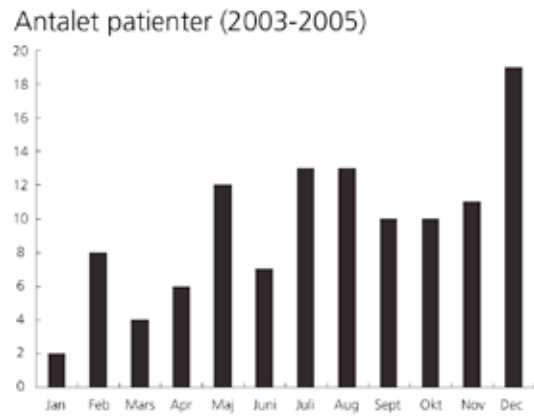
bukspottskörteln. Processen sträcker sig över längre tid, men trots detta verkar den symtomgivande debuten av sjukdomen vara säsongsberoende. I en global studie på barn verkar insjuknandet i högre grad inträffa vår och höst vilket tyder på att omställningar mellan vinter och sommar har en stressande och immunaktiverande effekt. Se även Figur 12.



Figur 12.
Visar risken att insjukna i diabetes i Finland (heldragen linje), studiens nordligaste plats, samt i New South Wales (streckad linje), den av platserna i den sydliga hemisfären med mest pålitlig statistiskt urskiljbar säsongspåverkan. Återgiven efter tillstånd av John Wiley and Sons

Utöver en säsongsberoende effekt finns också en dygnsberoende variation. Cortisol är ett steroidhormon som produceras i binjurekörteln och som utsöndras vid ansträngande, fysiska såväl som mentala, omständigheter. Melatonin är ett hormon som behövs för vår nattsömn. Under efternatten korrelerar låga cortisol- och höga melatonin-halter med höga nivåer av T-hjälparceller typ 1, d.v.s. en typ av vita blod-kroppar som aktiverar det cellförmedlade immunförsvaret. Det är det cellförmedlade immunförsvaret som är alltför aktivt vid sjukdomar där immunförsvaret angriper kroppens egen vävnad, något som också förklarar varför patienter med reumatism har mer ledvärk och stelhet på morgonen (Cutolo 2006).

Vid inflammatorisk tarmsjukdom[16] är bilden något mer komplicerad – visserligen föreligger ökad sjukdomsaktivitet under december, men även under sommaren är aktiviteten högre. Teoretiskt skulle man kunna tänka sig stresseffekter både av mycket och lite ljus, men sambandet med lediga perioder och den inverkan dessa kan ha ur stressynpunkt bör nog inte heller underskattas. Se Figur 13.



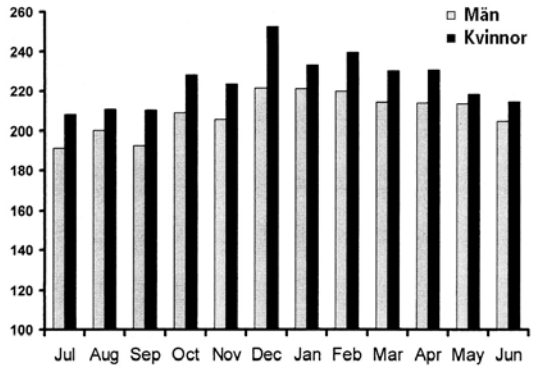
Figur 13.
Årtidsvariationen i sjukdomsaktivitet för patienter med inflammatorisk tarmsjukdom. Y-axeln visar antalet patienter med återfall av 18 patienter. Återgiven efter tillstånd av Springer

Hjärtkärlsjukdomar – dygn och årstid

Insjuknande i hjärtinfarkt påverkas av tiden på dygnet såtillvida att flest insjuknar mellan kl. 6 och 12 på förmiddagen. En viss ökning kan också noteras mellan kl. 6 och 12 på kvällen. Medicinering med betablockad, en medicin som bl.a. minskar stressutlöst puls- och blodtrycksreglering, kan minska denna dygnsberoende effekt (Hansen 1992). Cortisolnivån är högre på morgonen och möjligen kan den stresseffekt som uppstår både av uppstigandet på morgonen och av den neurohormonella omställningen bidra till att öka risken. Förekomsten av hjärtsvikt och även risken för dödsfall i hjärtsvikt är högre på vintern och som lägst på

[16] Ulcerös colit och Crohns sjukdom, d.v.s. inflammation p.g.a. att immunsystemet angriper tarmen

sommaren. Se figur 14. Till detta kan naturligtvis förutom ljuset även temperaturen bidra, då kall väderlek kan påfresta hjärtat. Undersökningen genomfördes i Skottland.



Figur 14.
Dödlighet i medeltal per dag av dem som blivit inlagda på sjukhus för hjärtsvikt under perioden 1990 till 1997. Siffrorna representerar det sammanlagda medeltalet för varje månad. Återgiven efter tillstånd av Elsevier

Centrala nervsystemet

Centrala nervsystemet är utomordentligt påverkbart av ljuset. Ljusberoende depression är ett välkänt fenomen som drabbar 1-10% av befolkningen där nedstämdheten med framgång kan behandlas med vitt ljus även om andra behandlingar också kan ges. Förutom sedvanliga antidepressiva har bl.a. även blått ljus föreslagits kunna ha effekt (Howland 2009).

Just användandet av specifikt ljus vid sjukdomstillstånd är ett nytt och spännande område. Vid stavgång hos Parkinsonpatienter förbättrades gångförmågan om staven spred ut grönt ljus jämfört med rött eller inget ljus (Bryant 2010).

Forskning i Lund

Lunds universitet har en bred och gedigen forskning inom medicin och associerade fält. Det finns ingen samlad kompetensuppbyggnad kring ljusets medicinska effekter, men det är påtagligt att ljuset blir medicinskt intressant i allt fler vetenskapliga sammanhang.

Det finns ett växande antal studier som indikerar att ljuset har väsentlig medicinsk betydelse. Det är dock svårt att finna ett samlande vetenskapligt perspektiv på den medicinska ljusrelaterade forskningen. *Medline* är en ledande databas över medicinsk forskning som publicerats i referee-granskade tidskrifter. En sökning på ”health and light” gav 27 787 artiklar, men många är tyvärr inte relevanta för vår frågeställning. En avgränsning till översiktsartiklar på engelska med humanforskning gav 245 hits, men en genomgång av 100 rapporter gav tyvärr inte så mycket matnyttigt. Sökningar mot specifika frågeställningar gav i stället mer, varför någon övergripande sökalgoritm inte kan anges.

Vid Lunds universitet finns i sökmotorn 21 sidor avhandlingar, under tiden 1987-2010, som på något vis relaterar till ljus, men aspekten ljus och hälsa förkommer inte. Det närmaste var Rikard Küllers arbeten kring miljöpsykologi. Trots mer än 20 års verksamhet inom Lunds universitet har jag heller inte kännedom om någon tidigare eller pågående forskning kring dessa aspekter. Med andra ord föreligger en påtaglig potential att utveckla forskningsfältet.

En intressant aspekt är de biologiska ”klockorna”. Tidskriften *Journal of biological rhythms* relaterar huvudsakligen icke human forskning kring biologiska rytmer. Dock finns en del spännande artiklar även om rytmer och sjukdomstillstånd hos människan. Tidskriften relaterar dessutom till *Society for Research on Biological Rhythms* som har konferenser vartannat år sedan 20 år tillbaka. Mötena hålls i USA och Canada och det finns även forskargrupper i Frankrike och Asien. Forskningen ligger ofta inom enheter för ögonsjukdomar, ibland Chronobiology, Sleep disorder etc., dvs. inte Ljusforskningsgrupper.

Någon svensk enhet kunde inte identifieras för 2008 trots att det var en konferens med ett flertal publikationer (17-21 maj, 15 symposier, 300 posters, planeringsmöten mm). Ett möte med *National Institute of Diabetes and Digestive and Kid-*

ney Diseases om *Circadian Rhythms and Metabolic Diseases* genomfördes i april 2010, i USA, vilket innebär att medvetandet om dessa frågeställningar börjar vakna internationellt.

Ett konkret exempel är att för olika synproblem finns mer eller mindre bra belysning, t.ex. vid makuladegeneration (där skarp syn försvinner då gula fläcken försämras) är det viktigt att ge bra förutsättningar för patientens stavseende sedan tapparna är skadade.

Tillsammans med de referenser som ges i texten visar den litteratur som hänvisas till under ”övrig litteratur” på den vetenskapliga grunden för beskrivningen av ljus som medicinskt fenomen.

Slutsatser

Ljus reglerar vår biologiska rytm och det gäller inte bara vakenhet och sömn utan även hormonella, immunologiska och centralnervösa rytmer. Följaktligen har ljus en avgörande inverkan på vår allmänna hälsa. Även om de ovan relaterade undersökningarna talar för mångfaldiga effekter av ljus på vår hälsa utgör de ändå bara ett axplock av vad som är känt och även möjligt. Både den årstidsberoende och den dygnsberoende variationen påverkas av olika former av ljusintervention. Årstidsvariation för sjukdomar och ökad sjuklighet av skiftarbete utgör centrala exempel.

Vi har generellt sett en ökad sjuklighet under vintern, vilket märks på belastningen på landets akutmottagningar vintertid. Det handlar både om ljus- och temperatureffekter. Depression kan t.ex. vara direkt ljusberoende medan influensavirus sprids bättre i kall och torr luft. Vissa sjukdomstillstånd är vanligare vår och höst. Förutom insjuknandet i diabetes enligt ovan är t.ex. magkatarr vanligare under dessa brytningsperioder. Slutligen har vi tillstånd som är vanligare sommartid, där vi återigen måste beakta både ljus och väderlek som bidragande faktorer. Vissa hudsjukdomar påverkas t.ex. av ljuset.

En tvärvetenskaplig organisation skulle kunna bidra med en övergripande genomgång och systematisering av vilka tillstånd som kan hänföras till vilken årstid eller typ av ljus, dvs. mycket ljus, lite ljus eller avtagande respektive tilltagande ljusnivåer. Framförallt viktig är kanske kompletterande forskning kring ytterligare tillstånd som skulle kunna vara ljusberoende och då också möjliga att påverka och/eller behandla med olika former av ljusterapi. Viktigt i sammanhanget är också möjligheten till modifierad ljusmiljö på arbetsplatser, i hemmet etc. som profylax mot vissa tillstånd.

Vi har således först nu börjat bli medvetna om dessa samband men samtidigt är mycket fortfarande outrett, som t.ex. effekten av ljus med viss våglängd eller effekten av olika ljus över dygnet som behandlingsmetoder vid olika specificerade sjukdomstillstånd. Behovet av forskning kring dessa frågeställningar är stort och ett övergripande samarbete mellan olika grupper är nödvändigt.

7
LJUS SOM PSYKOLOGISKT FENOMEN

Från en psykologisk utgångspunkt kan ljusets betydelse ses utifrån flera perspektiv. Dels finns de visuella sambanden mellan människa och ljus och även de icke-visuella effekterna. Båda ingår i människans förmåga att tolka den situation man befinner sig i och den egna anpassningen till denna omgivning.

Begreppet kognition är ett komplicerat begrepp som är beroende av kunskaper om perception, minne, beslutsfattande, bedömningsprocess, språk osv. Lazarus (1991) var en banbrytande forskare inom området när han förklarade de kognitiva aspekternas betydelse för människans välbefinnande. Han beskrev hur vilken händelse i yttervärlden som helst kan upplevas som en stressor[17]. Lazarus var också tydlig med att ingen händelse eller företeelse kan identifieras som stressor utan att man känner till personens tendens att reagera på denna typ av händelser.

Hur vi upplever ljus involverar människans kognitiva processer d.v.s. hur vi bedömer den typ av ljus vi befinner oss i. Väcker ljuset goda minnen och positiva emotioner ökar sannolikheten för att vi skall uppleva välbefinnande och mindre stress.

Emotionsforskningen startade med Charles Darwins klassiska bok *The expression of the emotions in man and animals*(1872). Han argumenterade för att det finns en medfödd universell plattform för våra känslouttryck. Antonio Damasio (2002) skriver i sin bok *Känslan av att leva* att känslorna är oerhört viktiga för vår överlevnad. Damasio pekar främst på två funktioner. Den första handlar om vår reaktion på händelser, d.v.s. vilken affekt som väcks till liv och visar sig i våra ansikten. Detta är en signal till omgivningen om vad vi upplever för emotion, men samtidigt en signal till det inre om vad vi skall göra. Om en händelse väcker rädsla, skall vi då fly eller slåss, för att beskriva det i enkla kategoriseringar. Denna beskrivning är också Damasios andra funktion för känslorna, nämligen att reglera organismens inre tillstånd.

Känslor är en viktig del av vår anpassning till den situation vi befinner oss i. Lazarus beskriver två typer av anpassning där den ena är mer kognitivt styrd medan den andra är mer emotionellt styrd. Bägge anpassningsstrategierna har som syfte att skapa homeostas i inre mening, d.v.s. optimal anpassning.

Alla slags känslor bidrar till att människan kopplar ihop händelser med sina inre jämviktssökande funktioner (inlärningsmekanismer), allt i syfte att nå optimalt goda strategier. Färger och ljus kopplas hos det lilla barnet snabbt ihop med olika typer av minnen som senare i vuxen ålder väcks till liv i enkla kategorier som gott och ont, lust och olust.

Det är en krävande uppgift att avgöra vad som egentligen fysiologiskt och psykologiskt sett är bra belysning. Belysning är ett intressant exempel på att våra bedömningar och ”emotioner” färgas av våra tidigare upplevelser. Den som upplevt en bra barndomsmiljö i glödlampsljus tenderar att känna sig trygg i en miljö med glödlampsljus. Den här formen av inlärda känsloupplevelser är svår att komma runt med vetenskapliga studier. Det rimligaste antagandet vi kan göra tycks vara att vi på en

[17] Belastning som frammanar kroppsliga och psykiska reaktioner.

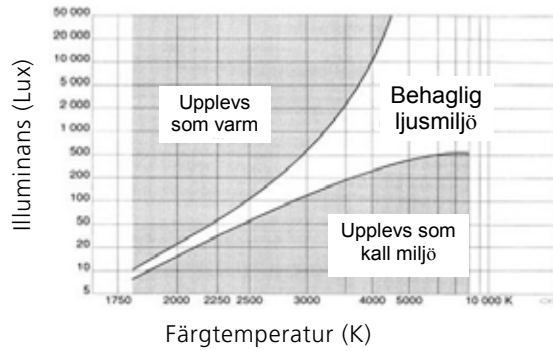
grundläggande kroppslig och mental (och kanske psykosocial) nivå är anpassade till ett liv i dagsljus. De känslorelaterade upplevelserna påverkas både av visuella och icke-visuella effekter. Det tolkande visuella seendet påverkas av visuella effekter som kan vi dela upp i rent ljusmässiga effekter som t.ex. skuggbildning, bländning etc., och dels de, vilka är kopplade till färg; kulör, styrka och svarthet (hue). De icke-visuella effekterna handlar i huvudsak om flimmer och ljusets kronobiologiska betydelse.

Ljuset är en förutsättning för människans visuella perception och detta faktum har inneburit att mycket forskning har ägnats åt hur ljuset påverkar den visuella upplevelsen. Den effekt som studerats allra mest avseende perception av ljus är bländningseffekten. Blicken dras reflexmässigt mot de ljusaste punkterna i omgivningen vilket ytterligare förstärker effekten. Bländning leder till ögonbesvär och även till problem att se i omgivningen. Dessutom kan bländning leda till ergonomiska problem då man genom att ändra arbetsställning försöker undvika bländningen. Problemen kan uppstå med såväl konst-ljus som dagsljus.

Forskningen om ljus har i huvudsak fokuserat på visuella aspekter. Det är grundläggande att ha bra belysning på arbetsytan. Forskningsresultaten visar också att likformighet hos ljuset, bländning och färgåtergivning är viktiga aspekter för att uppnå en god prestationsnivå.

Omfältsljuset, d.v.s. ljuset runt oss har studerats i betydligt mindre utsträckning och då i första hand för att reducera bländning. För låga nivåer av omfältsljus påverkar adaptationen negativt och sannolikheten för bländning ökar. En annan studie undersökte preferenser för omfältsljuset. Försökspersonerna fick anpassa nivåerna av direkt och indirekt ljus i en kontorsmiljö. Resultaten visade att man föredrog proportionerna 55 % indirekt och 45 % direkt ljus. Med dessa proportioner var den mest uppskattade luminansnivån i taket 128 cd/m^2 och 78 cd/m^2 på väggen med en konstant horisontell belysningsstyrka av 500 lux på arbetsytan.

Många studier har också ägnat sig åt kopplingen mellan perception och upplevelse. Här finns ofta en direkt samverkan mellan ljus- och färgforskningen. Man arbetar med frågeställningar som handlar om hur vi upplever en miljö beroende på ljus- och färgsättning. Genom att använda ljus med olika spektral sammansättning påverkas färgupplevelsen av färgade ytor och objekt. En klassisk studie av Kruithof, 1941, kan inte förbigås. Han fann att när belysningsstyrkan (illuminansen) var hög föredrog försökspersonerna högre färgtemperaturer (d.v.s. ett kallare blåaktigt ljus), medan när belysningsstyrkan var låg föredrog man lägre färgtemperaturer (d.v.s. ett varmare rödgult ljus), Figur 15. Andra studier har visat att man föredrar kallare ljus mitt på dagen, och att denna preferens minskar fram mot kvällen.



Figur 15.
Förhållandet mellan belysningsstyrka och färgtemperatur för upplevelsen av ett behagligt ljus (se Chain et al.1999)

Ljus och färg påverkar också vår upplevelse av rummet. Dessa samband är mycket komplexa till sin natur, men försök har gjorts att förstå hur olika komponenter tillsammans inverkar. Man har t.ex. studerat upplevelsen av en interiör under olika färgförhållanden. Ett rum var målat i en varm röd färg, medan ett annat var målat i en kallare blå färg. Den röda färgen upplevdes som mer komplex, och orsakade en högre arousal[18] än det blå rummet.

En stor del av ljuset i en inomhusmiljö kommer från dagsljus och fönstrens betydelse för upplevelsen av en interiör har undersökts. Flera studier indikerar att dagsljus medverkar till att skapa ett

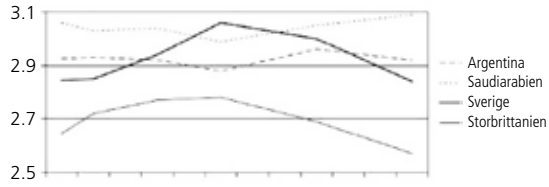
[18] En mer intensiv känslomässig aktivering.

välbefinnande i miljön samt till en förbättrad kontakt med världen utanför och dess växlingar. Man har vidare funnit att fönster i klassrum uppskattas av elever. Bland annat har det visat sig att barn med hög sociometrisk status väljer plats i klassrummet nära fönster. I en annan studie visade det sig att barns beteende i klassrummet över året såg olika ut i klassrum med respektive utan fönster. Barnen som satt i klassrum utan fönster arbetade mindre tillsammans än barn som hade sitt klassrum utrustat med fönster. En nyligen genomförd studie pekade på att barn som hade större tillgång till dagsljus presterade bättre på läsförståelsetest efter ett halvårs exponering.

När det gäller preferenser eller känsloassociationer för ljus och färg är det slående att det finns hög samstämmighet mellan olika individer, mellan olika grupper och mellan kulturer. Detta har lett till en förklaringsmodell där man säger att antingen ”lär” vi oss rätt responser, eller så finns det en nedärvd förmåga som präglar upplevelsen av specifika ljus/färg kombinationer. Dagens teoribyggnad runt denna fråga har lämnat den tankekonstruktionen. Istället försöker man förstå hur de båda aspekterna fungerar tillsammans. Att biologi och kultur skulle verka i totalt motsatsförhållande till varandra verkar inte särskilt troligt. Speciellt inom färgforskning har ett mer mångsidigt tänkesätt utvecklats. Signalfärger är något som går igen inom både växt- och djurvärld och är rimligen ett gammalt fylogenetiskt system. Som exempel kan nämnas röd flugsvamp, getingar, giftormar mm. Tidigare var våra utryckningsfordon utrustade med röda lampor, men numera med blå, vilket är ett exempel på övergång från en klassisk nedärvd signalfärg till en som vi fått lära oss.

Ljus kan även påverka människan subliminalt, dvs. utan att vi medvetet ser det. Flimmer från en ljuskälla kan oftast inte uppfattas om flimmerfrekvensen är mer än 90 pps, men vi kan med hjärnan registrera flimmer upp till åtminstone 130 pps. Med gamla drivdon för lysrör gav 50 Hz växelström ett 100 pps flimmer. Man har visat att arbete under lysrörsbelysning med detta flimmer ger upphov till sämre reaktionstid och fler fel i lästest. Coleman visade att autistiska barn blev mer oroliga när de exponerades för flimrande (100 pps) lysrörsbelysning. Wilkins kunde i en fältstudie visa att 100 pps flimmer från lysrör gav upphov till huvudvärk och ögonbesvär. Ytterligare studier har visat att försökspersoner arbetar snabbare men gör fler fel vid korrekturläsning om man exponeras för flimmer och har hög CFF (critical flicker fusion frequency[19]). Den gruppen av sensitiva individer uppvisade också högre arousal mätt med EEG under flimmerexponering.

Ett tydligt samband mellan dagsljus och känslor föreligger vid årstidsrelaterad nedstämdhet (SAD) i länder långt från ekvatorn, framför allt under den mörka årstiden. Nedstämdheten karaktäriseras av minskad aktivitetsgrad, socialt tillbakadragande och emotionella förändringar med ökade inslag av nedstämdhet. Flera studier har visat årstidsrelaterad variation för emotioner, med ökad förekomst av negativa känslor under höst och vinter (Figur 16). Breddgrad, årstid, väderförhållanden och avstånd till fönster påverkar alltså individens känsloskattning i en viss miljö.



Figur 16
visar hur känslorna förändras med årstidsväxlingarna i Argentina, Saudiarabien, Sverige och Storbritannien (efter Küller m.fl.2006).

Psykologisk kompetens i Lund

Institutionens forskning täcker stora områden inom psykologin. Verksamheten är tematiskt organiserad i avdelningar. Dessa är: avdelningen för arbets- och organisationspsykologi, klinisk psykologi, kognition, neuropsykologi, personlighets- och

[19] Den lägsta frekvens av ljuspulser som upplevs som kontinuerligt ljus

socialpsykologi samt utvecklingspsykologi. Därtill bedrivs forskning inom avdelningsövergripande nätverk. Olika typer av forskningsmetodik används, allt från experimentella laboratoriestudier till fältstudier i samhället.

Miljöpsykologi

Under mer än 20 år var Rikard Küller, Miljöpsykologi, LTH, en internationellt ledande forskare inom ljusrelaterad forskning inom miljöpsykologi. Den grund han lade har fortfarande aktualitet och verksamheten vid avdelningen för miljöpsykologi har två seniorforskare och fyra doktorander aktiva. För närvarande pågår forskning rörande ljusets inverkan på människors hälsa och välbefinnande. Andra forskningsområden är miljö för barn och för äldre människor, arbets-, musei- och trafikmiljö samt förutsättningarna för ett uthålligt samhälle. Vid avdelningen är också CEEBEL, Centrum för Energieffektiv Belysning placerat. CEEBEL är ett samverkansprojekt mellan Lunds Universitet och Tekniska Högskolan i Jönköping som genomförs och finansieras inom ramen för Energimyndighetens *Program för energieffektivisering inom belysningsområdet*.

8
LJUS SOM ESTETISKT FENOMEN

Några ord om estetik

Ordet estetik kommer av grekiskans *aisthesis*, vilket närmast kan översättas med förnimmelse eller känsla. Även om dessa begrepp på olika sätt diskuterats i alla tider, är det inte förrän på 1750-talet som begreppet estetik myntas av Alexander Gottlieb Baumgarten (1714-1762), vilket också innebar att ett speciellt område av filosofin, som handlar om sinneserfarenheter, börjar mutas in. Till en början kom estetiken att domineras av kunskapsteoretiska aspekter på förnimmelser, och det är inte förrän i samband med Immanuel Kants kritiska filosofi som estetiken blir ett självständigt område inom filosofin. Så småningom kom estetiken att domineras av diskussioner om synintryck och visuell skönhet. Idag kan man nästan se hur en gängse uppfattning felaktigt sätter likhetstecken mellan estetik och visuell skönhet (ljud, doft, smak och känsel glöms bort just i samband med begreppet estetik). I sammanhanget är det också viktigt att påpeka hur estetiken med tiden kom att behandla frågor om hur vi diskuterar sinnesintryck, snarare än strävan att formulera ett regelsystem kring skönhet. Under senare årtionden har kulturstudier med estetiska förtecken blivit viktiga i Visual Culture studies, t.ex. studier av hur makt, politik, etnicitet, kön eller klass återspeglas i de bilder och bildkulturer som samhället producerar/konsumerar.

Ljusets estetik

Ljus är själva grundförutsättningen för visuella intryck, vilket i sin tur medför att olika estetiska aspekter på rum, färg och föremål är ljusberoende. Det är kanske just detta självklara samband mellan ljus och synintryck, som paradoxalt nog gjort att ljus och estetik diskuterats i relativt liten omfattning. Ljus och ljusfenomen har under olika epoker givetvis undersökts och diskuterats av tänkare som Robert Grosseteste (ca 1168–1253), Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) eller John Ruskin (1819-1900) och Hans Blumenberg (1920 - 1996). Ljus har genom åren även varit en viktig aspekt i olika konstnärliga utbildningar, men det

Figur 17.
Ljuskällans inverkan på upplevelsen av rummet.
James Turrell: Gard Blue (1968)

Figur 18.
Ljuset löser upp former och rum på ett ekvibrilistiskt sätt. Kapoor Anish: The Origin of the World (2004)

är knappast någon överdrift at påstå att t.ex. kulturella aspekter på ljus diskuterats i ringa omfattning. Grovt sett kan man dela in ljusets estetik i fyra huvud-kategorier: Inledningsvis kan man visa den konkreta behandlingen av ljus och ljusfenomen i exempelvis konst och arkitektur. Många sakrala byggnader (t.ex. Klippans kyrka av S. Lewerentz, uppförd 1962-66) karaktäriseras av hur fönster, ljusinsläpp och artificiell belysning samverkar på ett effektfullt sätt. Dan Flavin, James Turrell eller Anish Kapoor är konstnärer som på olika vis, arbetat med ljus. Hos Flavin utgörs verket av ljuskällan och det ljus som frambringas (neon eller lysrör), medan Turell snarare arbetar med dagsljus eller ljuskällans inverkan på rums-upplevelsen. Se Figur 17 och 18.

Kapoor har i flera av sina verk arbetat med materialiteten hos färger, där ljuset på ett ekvilibristiskt sätt löser upp former och rum. Här är det viktigt att påpeka hur scenografi, men även belysning i olika kommersiella sammanhang arbetar med ljus.

En andra kategori handlar om att avbilda ljus. Utifrån ett traditionellt konstperspektiv, ställs vi här inför i stort sett all avbildande konst, eftersom den per automatik söker avbilda ljusförhållanden. Se Figur 19.

Ljuset som symbolbärare är en tredje kategori. Här kan man tänka sig andra kultursammanhang än de rent visuella. Inte minst i religiösa sammanhang kan man tala om ”varde ljus” eller ”mörkrets furste”.

Avslutningsvis utgör design av ljuskällor en egen kategori. Precis som med många andra bruksföremål, har designen av lampor, armaturer och andra ljuskällor utvecklats till en speciell genre inom industridesignen. Exempel: Poul Henningsens PH5 eller den amerikanska polisfick-lampan *Maglite*, se figur 20.

Figur 19.
Att avbilda ljus. Även om ljus är verksamt i all bildkommunikation, förmår vissa bilder att beskriva ljuset på ett mer övertygande sätt. Exempel kan hämtas från så väl utstuderade reklambilder som målningar av Johannes Vermeer van Delft. (1632-1675).

Figur 20.
Ficklampan Maglite används sedan länge av den amerikanska polisen, men har även blivit en succé på den civila marknaden världen över.

Det urbana ljuset

I de satellitbilder som fotograferats av Europa på natten, indikerar ljuset befolkningstätheten. Bilderna berättar också om i vilken stor utsträckning som ljuset används. Nere på marken förändras stadens karaktär mellan dag och natt. Genom det artificiella ljuset är ljuset nu hela tiden påtagligt närvarande. Detta skapar en eterisk urban miljö, ett slags verklighet som iscensätts utifrån kommersiella motiv, trygghets-, orienterings- eller maktmotiv. I allt detta verkar estetiska ställningstaganden. Se Figur 21.

Ljusskeptiker

Ljus kom att utvecklas till ett av modernismens honnörsord, inte minst inom arkitekturens område. Vid sidan av ljusets medicinska (mot tuberkulos, rakitis mm.) och hygieniska betydelse fanns givetvis ett starkt symbolvärde i prioriteringen av ljusa miljöer. Samtidigt har (och är) också frågan om ljus inom arkitekturen kulturellt betingad. Den japanske författaren Junichiro Tanizaki skrev redan 1933 essän *Till skuggornas lov* (Ineiraisan), där han framstår som något av en ljusskeptiker. Tanizaki såg hur olika värden i klassisk japansk arkitektur gick förlorade i kontakten med västerlandet. Det är framförallt elektrifieringen och det elektriska ljuset

Figur 21.
Skymningsbild från Amsterdam. Successivt byts dagsljuset ut mot det artificiella ljuset som iscensätts utifrån kommersiella motiv, trygghets-, orienterings-, eller maktmotiv. (foto Lars –Henrik Ståhl)

som han vände sig mot. Den subtila skönheten hos de gamla japanska rummen och bruksföremålen förstördes i det elektriska ljuset. Även kabeldragningar och de elektriska ljuskällorna (i sig själva) ansåg Tanizaki vara fula inslag i de moderna miljöer som trängde ut den traditionella japanska arkitekturen. Den nationalism som kommer till uttryck mellan raderna i *Till skuggornas lov* kan uppfattas som etnocentrisk och förändringsobenägen, men måste läsas mot bakgrund av att essän är skriven i det japanska imperiets kulturklimat innan andra världskriget. Trots detta kan man säga att det finns tänkvärda observationer i *Till skuggornas lov*. Tanizakis skepsis kan snarast beskrivas i termer av hur kvalitativa ljusegenskaper fått ge vika för oreflekterat bejakande av ljusets kvantitativa egenskaper.

Förmågan att uppskatta det dunkla, i betydelsen det svaga ljusets kvalitativa egenskaper, är ett utbrett kulturellt fenomen: allt från mapuchefolket i Chile som utvecklat en speciell samtalskultur i mörker till den gamla svenska traditionen att ”kura skymning” (att kontemplativt invänta skymningen och se hur dagrar ändras). Inom scenografins/filmens område är den kvalitativa ljussättningen betydelsefull, vilket i sin tur påverkat modern och samtida ljussättning där belysningstekniken blivit allt mer raffinerad i möjligheten att på olika sätt ge önskad karaktär åt rummet.

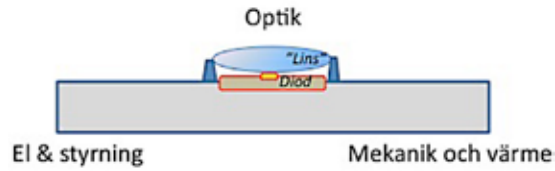
9
TEKNIK

I den industrialiserade delen av världen tillbringar människor mer än 85 % av dygnet i byggnader, som till stor del har artificiell belysning och många påverkas av artificiellt ljus och oljus även på natten. Artificiell belysning är en av de största användarna av energi i moderna byggnader. Dagsljus och energiflöden genom fönster är en viktig energiaspekt. Dessutom påverkar ljusstyrkan och ljusets kvalitet produktivitet, trivsel och hälsa.

Dagsljus har väsentliga fördelar. Allt för starkt och bländande ljus har dock också allvaliga nackdelar. Stora glasfasader orsakar värmeförluster på vintern och obehaglig uppvärmning på sommaren, och det är ändå osäkert om ljuset blir bra. I många fall skärmar man av dagsljuset samtidigt som man har ljuset tänt. Arkitektur för att ta flexibel kombinerad nytta av dagsljus och belysning är en komplex uppgift.

För att kunna skapa högvärd belysning är det viktigt att förstå användarnas behov, vad de säger att de vill ha och vad de egentligen vill ha eller borde vilja ha. Den flervetenskapliga ljusforskningen kan ge grund för en tydligare, mer uppdaterad och förnyelseinriktad begreppsbildning. Grunden för detta bygger på de tidigare presenterade ämnesområdenas forskning. En förfinad begreppsbildning kan ge möjlighet att tydligare beskriva vilken ljussättning vi bör skapa.

Den tekniska basen för belysning bygger på de grundläggande ljusskapande processerna. Det finns väsentlig utvecklingspotential i att utveckla och ta nytta av lysdioder. Lunds flervetenskapliga satsning på ljusforskning inkluderar lysdiodutveckling. En grund är att stimulera till utveckling av teknisk systemkunskap som knyter an till kunskapen om olika former av ljusbehov och som samtidigt tar upp lysdiodernas kopplingar till optik, elförsörjning, styrning, mekanik och värmetransport. Figur 22 visar en schematisk bild av en diods lysande punkt och hur den är monterad.



Figur 22. Diodens aktiva punkt har koppling till elförsörjning, värmeavledning och optik.

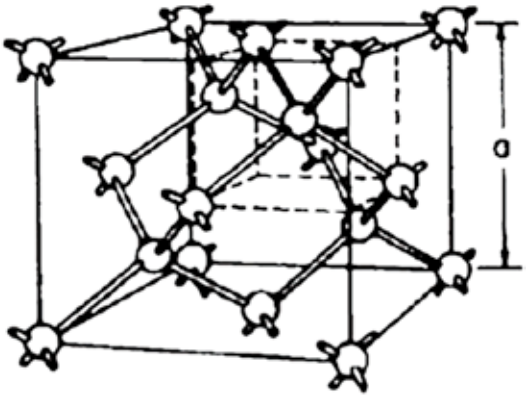
Belysning håller på att förändras från att ha varit ett relativt statiskt teknikområde till en teknik med mycket mer avancerad styrbarhet och snabbare utveckling. Affärslogiken förändras och får allt mer koppling till aktörer inom elektronik och informationsteknik. Samtidigt är det viktigt att notera att möjligheten att introducera den nya tekniken på ett snabbt och hållbart sätt har många kopplingar till olika aktörer inom byggsektorn och att det finns komplexa samband mellan vad olika aktörer gör.

LED

Lysdiodens funktion bygger på att med elektrisk excitation skapa möjligheterna för elektroner att genomgå övergångar från ett högre till ett lägre energitillstånd genom att sända ut en foton (ett ljuskvanta) med en våglängd eller färg som motsvarar denna energiskillnad. I princip är detta samma sorts processer som ger de specifika övergångarna och färgerna hos en atom som exciterats, d.v.s. elektronen återgår till sitt grundtillstånd genom att skicka ut en foton vars energi motsvarar skillnaden mellan initial- och sluttillstånden. Det fördelaktiga med hur detta sker i en lysdiod består i hur man

åstadkommer ”excitationen” som leder till ljusutsändningen.

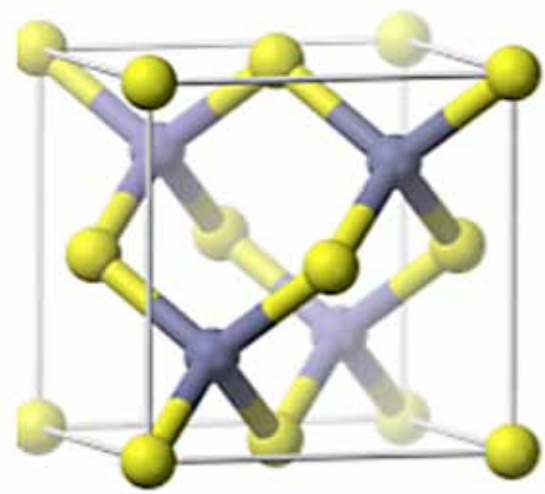
En halvledare är uppbyggd som en kristall, vilket betyder att varje atom i kristallen befinner sig på välbestämda positioner. En typisk kristallstruktur är den s.k. diamantstrukturen (Figur 23) vilket är kristallstrukturen för kol (C) i sin hårdaste



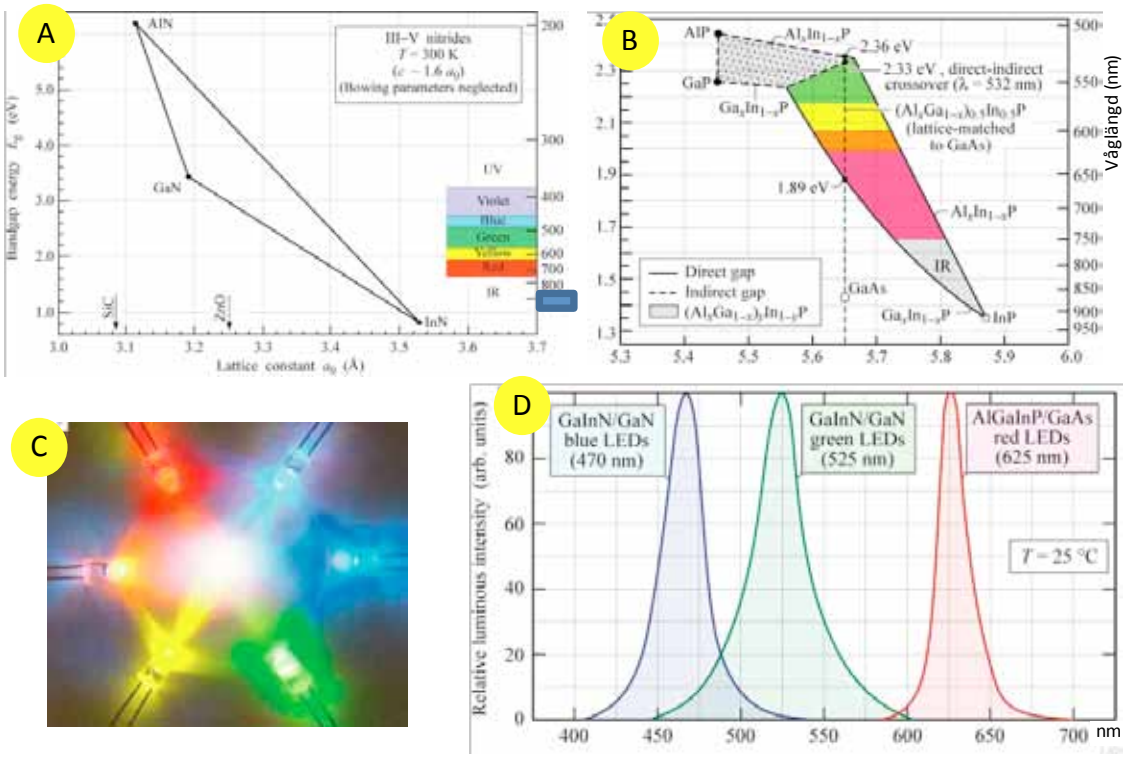
Figur 23.
Diamantstruktur (för C, Si och Ge)

form, diamant, som elektriskt har egenskaper som bäst kan beskrivas som en isolator. Diamantstrukturen är även kristallstrukturen för kisel (Si) och germanium (Ge), vilka båda är viktiga halvledare. Strukturen är likartad för GaAs, se Figur 24. Varje atom omges av fyra närmaste grannar, vilka sitter i en tetraederstruktur, som om en atom sitter i mittpunkten av en tetraederformad gräddförpackning och de fyra närmaste atomgrannarna i tetraederns fyra hörn. Att de är halvledare betyder att de har ett s.k. bandgap, ett förbjudet energiband, som är relativt stort, typiskt mellan 0,5 och 3,5 elektronvolt (eV). Ge har ett bandgap $E_g \approx 0{,}7$ eV och kisel ett bandgap av $E_g \approx 1{,}1$ eV. Det förbjudna energibandet separerar det helt fyllda valensbandet från det helt tomma ledningsbandet, vilket resulterar i att alla halvledare uppträder som isolatorer vid låga temperaturer. Så är fallet även för diamant som har ett bandgap som är så stort som 5,5 eV.

Om man lyser på en halvledare med ett ljus som har större energi än dess bandgap finner man att halvledaren ger ifrån sig ett karakteristiskt ljus med en energi som motsvarar dess bandgap, vilket betyder att såväl germanium som kisel endast kan ge ifrån sig infrarött ljus (1,8 µm respektive 1,1 µm) medan diamants bandgap motsvarar ultraviolett ljus (225 nm). Lyckligtvis finns det andra halvledare för vilka man kan välja bandgap som ger synligt ljus. Speciellt åstadkommes detta med sammansatta halvledare där varannan atom kommer från kolumn III i periodiska systemet och varannan atom från kolumn V, dvs atomerna har i medeltal fyra valenselektroner, precis som för kol, kisel och germanium. Som exempel på sådana s.k. III-V halvledare kan man nämna GaAs ($E_g \approx 1{,}43$ eV), GaP ($E_g \approx 2{,}26$ eV) och GaN ($E_g \approx 3{,}4$ eV). Av dessa tre exempel har alltså GaAs ett bandgap som motsvarar infrarött ljus (870 nm), GaP motsvarande grönt ljus (550 nm) och GaN motsvarande ultraviolett (365 nm). Dessa olika halvledare kan även blandas så att man genom att blanda GaAs och GaP till GaAsP kan välja färg mellan infrarött till rött till gult och grönt. Detta material var ett av de tidigaste som blev använda för att tillverka lysdioder. Genom att blanda GaN med InN, vilket har ett bandgap i det infraröda området, kan man i princip skapa ljus av alla synliga färger, från violett till blått till grönt, gult och rött, genom att välja



Figur 24.
Zinkblendestruktur (för t ex GaAs)



Figur 25.
Genom att kombinera olika material kan man skapa dioder som ger olika färger. Blandningar av GaN med InN kan i princip skapa ljus av alla synliga färger, se A. GaAs, GaP och GaAsP kan blandas till färger mellan infrarött och grönt, se B. Ljus från olika typer av dioder kan blandas för att ge olika färgtemperaturer och färgmättnas, se C och D. (Schubert, 2006)

sammansättningen av materialet GaInN, se Figur 25. Det har dock hittills visat sig vara mycket svårt att med dagens GaInN/GaN-baserade lysdiodteknik åstadkomma ljus med våglängder längre än ca 525nm, vilket ger ett ganska blå-skiftande grönt ljus från sådana lysdioder. Likaså är det mycket svårt att med det andra dominerande lysdiodmaterialet, AlGaInP, nå ut till så korta våglängder som motsvarar ”mättat grön” färg, och man talar om ”the green valley” för att beskriva problemen att kunna producera en bra grön ljuskälla. Man kan också skapa färgkombinationer, dels genom att blanda olika typer av material och dels genom att blanda ljus från olika typer av dioder.

Om det vore så att halvledare bara kan uppträda som perfekta och rena material så skulle de ha mycket begränsad användning. Istället bygger nästan alla elektronik- och optoelektroniktillämpningar av halvledare på att man kan styra halvledarens elektriska ledningsförmåga genom att tillföra mycket små mängder av främmande atomer, man dopar halvledaren. Som exempel kan nämnas att man kan tillföra typiskt en på miljonen fosforatomer till en kristall av kisel, varvid varje sådan fosforatom lämnar ifrån sig sin extra elektron (P har fem valenselektroner medan Si har fyra) som kan leda ström – man säger att man har n-dopat halvledaren eftersom den nu leder ström med negativa elektroner som fritt kan röra sig i ledningsbandet. Om man istället tillför till kiselkristallen en boratom, där B har tre valenselektroner, så kan varje sådan tillförd B-atom ta till sig en elektron från valensbandet, vilket leder till att halvledaren leder ström med dessa fria positiva hål i valensbandet, och man

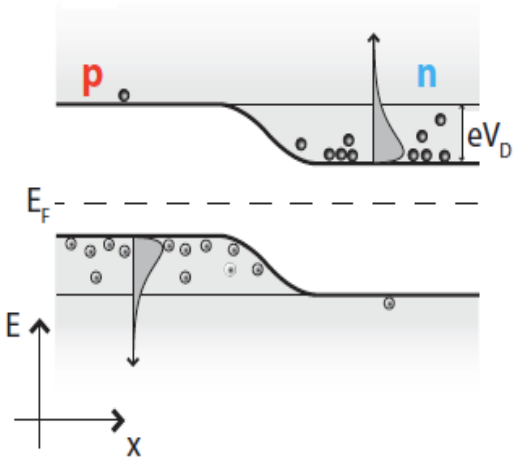
säger att halvledaren har p-dopats. Om man nu tar dessa begrepp ett steg längre och sätter samman en del av halvledaren som dopats n-ledande och en annan del som är p-dopad, skapar man en pn-övergång vilken uppträder som en diod, vilken endast släpper igenom ström i ena riktningen medan den blockerar strömmen i den motsatta riktningen av pålagd spänning.

Figurerna 26 och 27 visar vad som händer då man lägger på en yttre spänning över en pn-diod, varvid elektroner från den n-dopade sidan kan injiceras in i den p-dopade sidan och, på motsvarande sätt hålen från p-sidan injiceras till n-sidan, vilket i båda fallen resulterar i att de snabbt rekombinerar över bandgapet. Detta är funktionen hos en lysdiod, d.v.s. elektroner och hål injiceras till motstående sida där de uppträder som minoritetsbärare och snabbt rekombinerar genom att skicka ut fotoner med en energi som motsvarar bandgapet. För att ytterligare förbättra lysdiodernas egenskaper kan man ta till olika knep, t.ex. att i det aktiva området där man vill att ljusemissionen skall ske, bygga in s.k. kvantbrunnar där ett material med mindre bandgap omges av material med ett högre band-gap, varvid såväl elektroner som hål kan låsas in i dessa segment med lägre bandgap och med mycket hög effektivitet omvandla den tillförda elektriska energin till emission av fotoner. Genom att i det aktiva området, mellan n- och p-dopade delar av en GaN lysdiod, lägga in kvantbrunnar av GaInN, kan man t.ex. producera effektiva blåa och gröna lysdioder.

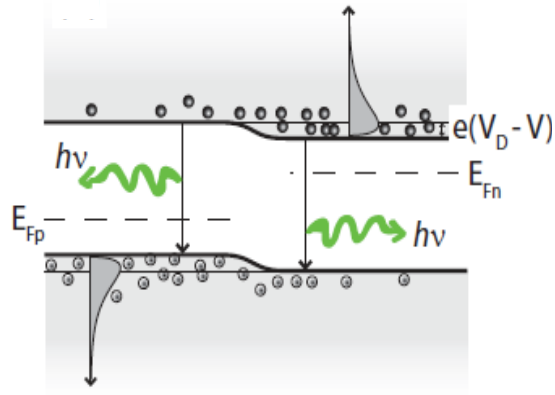
LED – Kompetensen i Lund och samhällsnyttan

Forskningen vid Lunds universitet kring halvledarfysik och halvledarteknik har pågått sedan mitten av 60-talet då avdelningen för Fasta Tillståndets Fysik blev inrättad med Hermann Grimmeiss som dess första Professor. Avdelningen utgör idag ett nav för en stor tvärvetenskaplig forskningsmiljö, Nanometerkonsortiet, vilket skapades 1988 som en av de första miljöerna i Europa fokuserat på det då knappt uppfunna fältet, Nanovetenskap och Nanoteknik. Idag arbetar bortåt 150 personer inom nmC@LU, vilket tilldelades ett av de Strategiska Forskningsområdena i Regeringens nya satsningar på sådana.

Den huvudsakliga kompetensen inom Nanoforskningen i Lund har utvecklats inom syntes och design av optimala egenskaper hos halvledare, där ett tungt forskningsfält är utvecklingen av ideala III-V halvledare i form av nanotrådar (nanowires) vilka är nanostrukturer som skapas genom styrd



Figur 26.
Pn-diod: Utan pålagd spänning då det finns fria elektroner på n-sidan och fria hål på p-sidan (Schubert, 2006)



Figur 27.
Pn-övergång. Med framspänning då elektroner injiceras från n- till p-sidan (Schubert, 2006)

självorganisation. Detta betyder att man utvecklar helt nya metoder för att tillverka ideala halvledarstrukturer och halvledarkomponenter och där nanodimensionen hos nanotrådarna möjliggör funktionalitet som inte kan åstadkommas lika väl med traditionella metoder. Viktiga tillämpningar är just realisering av III-V dioder och transistorer vilka tack vare nanoteknikens fördelar kan odlas direkt på kiselbrickor, vilket har stora tekniska och ekonomiska fördelar.

Forskningsmiljön har även skapat ett flertal företag där nanotekniken förs ut till kommersialisering, varav företaget GLO AB är speciellt intressant (www.glo.se), och där man 2010 uppför en pilotanläggning för tillverkning av GaN/GaInN nanowire lysdioder i stor skala. I ett nationellt, liksom i ett regionalt, perspektiv kan man se fram emot att Sverige och Lund kommer att kunna få en ansenlig del av utvecklingen av nästa generation av belysning.

Samhällsnyttan av de möjligheter inom LED-området som kommit fram ur forskningen vid Lunds universitet är självklart av stark energirelevans, med möjligheten att reducera energianvändning för belysning med en tiopotens. Samtidigt kan man enkelt inse att när hela västvärlden beslutat att avsluta användningen av glödlampor, och snart också förbjuda lysrör och kompakt- lysrörslampor på grund av miljöproblemen, är det mycket som talar för LED-tekniken. En möjlighet för Sverige som nation, att kunna utveckla en världsledande LED-teknik, med den infrastruktur som skulle följa med denna bas, kan bli exceptionellt viktig ur ekonomiskt perspektiv. När nu även så många andra perspektiv på denna teknik hanteras samtidigt inom ljussatsningen så ser möjligheterna för Sverige och för Regionen än mer intressanta ut.

Optik och värme

Nyttiggörandet av LED kräver nya former av optiska lösningar för att klara att distribuera ljus från en mångfald små intensiva ljuspunkter på ett samordnat sätt. Det är en extra utmaning att göra konstruktioner som kombinerar dioder med olika färgspektra. Ljusfördelningen från de individuella dioderna görs hittills med små linser eller koner och deras brytningsegenskaper varierar med våglängden.

För att tillverkningen skall bli ekonomiskt rimlig för ordinära ljuskällor är det viktigt att minimera kostnaden per diodlins. Den vanligaste tekniken för att klara detta är att gjuta diodlinserna i en optisk polymer, hittills ofta akryl eller polykarbonat. Det bör noteras att det finns många varianter av sådana polymerer och att många åldras väsentligt under diodens livstid. Ett vanligt problem är att plasten gulnar och då absorberar allt mer blått och grönt ljus, vilket påverkar ljusets spektralfördelning och färgtemperatur.

Då lysdioder används för belysning måste optiken i lamporna/armaturerna ofta samordna mikrofördelningar från ett flertal dioder med olika spektralfördelningar. Ljusfördelningarna måste samordnas för att ljussättningen skall bli funktionell och njutbar, vilket görs med hjälp av reflektorer av mer konventionell storlek. Detta skapar nya optiska utmaningar.

En alternativ möjlighet är att använda större dioder eller diodgrupper som var för sig kan leverera ett eller flera hundra lumen. Avancerade linslösningar utvecklas nu för att styra ljuset optiskt från sådana lysdioder så att ett belyst område eller föremål får den önskade belysningsfördelningen. Fördelen är då att det inte behövs någon kompletterande reflektor.

Den lysande ytan på en lysdiod är i de flesta fall minimal vilket innebär mycket höga luminanser (ytans ljushet) med påföljande bländningsproblematik. När optiska lösningar utvecklas måste bländningsproblemen beaktas vilket ställer ytterligare krav på funktionella lösningar.

Utöver ljusfördelningen i sig är det kritiskt att notera att skillnader i brytningsindex, mellan halvledar-materialen och ”linserna”, tenderar att leda till att en avsevärd del av ljuset reflekteras tillbaka in mot dioden. Detta gör att det effektiva ljusutbytet

försämras. En mer kritisk effekt av detta är dock att energiansamlingen gör att dioden blir varm, vilket är allvarligt för diodens ljusutbyte och ännu värre för dess livslängd.

Ett allt viktigare sätt att modifiera och optimera de optiska egenskaperna hos lysdioder är att mönstra ytan på nanometerskalan. Sådan mönstring, på en skala mindre än ljusvåglängden ("subwavelength optics"), kan ge antireflexegenskaper och därmed signifikant öka ljusutbytet. Det är även möjligt att påverka ljusets vinkelfördelning så att det blir en mer riktad ljusutsändning. I synnerhet gäller detta vissa bikake-liknande periodiska strukturer som kallas fotoniska kristaller. Dessa har den egenskapen att de styr både i vilka riktningar ljuset kan komma ut ur lysdioden och med vilka våglängder. Med rätt dimensioner kan även nanotrådarna i sig ge upphov till riktad ljusutsändning. I detta fall fungerar nanotråden som en vågledare, d.v.s. ungefär som en optisk fiber, och ljuset sänds främst ut från änden av nanotråden.

Utöver de optiska aspekterna i sig är det viktigt att "mikrolinserna" har bra värmeledande egenskaper och att de kan integreras i systemlösningar som transporterar bort diodernas och optikens spillvärme på ett effektivt sätt.

De nya typerna av utmaningar för optiken gör att det har blivit viktigt att kombinera olika former av teoretisk och tillämpad kunskap. Dessutom finns det många olika former av lysdioder och diod-tekniken utvecklas i snabb takt. Det är inte längre tillräckligt att konstruera en armatur med en statisk optisk lösning, för en viss form av standardiserad ljuskälla. För att hänga med krävs att man hela tiden gör anpassningar till de nya möjligheter och utmaningar som uppkommer. Detta gör att det finns behov av nya former av hjälpmedel för design av optiska lösningar för lysdiodlampor och lysdiodarmaturer.
Det finns behov att utveckla smidiga verktyg för de nya formerna av optiska beräkningar och för konstruktion av och integration i flerfunktionella systemlösningar. Utmaningarna för optiken har också koppling till att utveckla bättre optiska polymerer. Tillverkningen av mikrolinser med hög precision är tekniskt krävande.

Lund har ett antal forskare, inom olika områden, med kunskap om ögon och optik. Växtbiologerna och syngruppen som forskar på olika djurs ögon har djupa insikter i de material och mekanismer gör att levande varelser kan ta nytta av, och påverkas av ljus. Nanogruppen har ingående kunskap om material, halvledare och tunna skikt, och delar av den kunskapen är viktig för att förstå möjligheterna att rikta de fotoner som emitteras från fotoelektriska processer.

Industridesign, elsystem och ljusstyrning

Tillförsel av ljus kan lösas på många olika sätt. För att skapa attraktiva, effektiva och långsiktigt hållbara lösningar är det viktigt att förstå behovet av ljus och olika aspekter av den tekniska möjligheten:

1. Det är naturligtvis grundläggande är att förstå de tekniska möjligheterna att skapa olika sorters ljus och att kunna konstruera, tillverka och köpa olika sorters ljuskällor.
2. För att kunna göra en situations- och användaranpassad lösning är det lika grundläggande att förstå den aktuelle användarens verkliga och upplevda behov.
3. Det är också fundamentalt att förstå hur man konstruerar och bygger en totalt sett attraktiv och effektiv teknisk systemlösning som ger det önskvärda ljuset.
4. För att kunna förverkliga de aktuella möjligheterna måste man kunna definiera den ljussättning man vill ha och skapa förutsättningar för fungerande affärssamarbete.

Den flervetenskapliga ljusforskningen fokuserar kring punkt 2 och knyter an till ledande halvledarforskning och grundläggande materialvetenskap. För att kunna visa upp och förklara värdet av de nya tekniska möjligheterna och för att möjliggöra försök och fallstudier måste vi medverka i utveck-

lingen av tekniska systemlösningar. För att illustrationerna skall bli säljande och för att kunna utveckla verkligt funktionella, mänskligt välfungerande och uppskattade lösningar är det viktigt med design. Industridesign har till stor del handlat om att forma produkter på ett sådant sätt att de blir attraktiva på marknaden och samtidigt kan tillverkas i en industriell massproduktion, på ett rationellt och kostnadseffektivt sätt. I Lund handlar industridesign nu om att medverka i den bredare processen kring produktframtagning, från idé till färdig produkt. Designprocessen kan betraktas som ett verktyg för näringslivsutveckling. Den yttre formen kopplas till produktens funktion och sammanhang.

De sammanhang som industridesign knyter an till handlar till stor del om att möjliggöra effektiv industriell produktion och att skapa förutsättningar för affärssystemutveckling. Som nämnts är det också viktigt att valen av ljuskällor och tekniklösningar anpassas till sina relevanta miljö- och hållbarhetsmässiga sammanhang. En väsentlig miljöaspekt är hur elförsörjningen är löst och alla de, direkta och sekundära, negativa och positiva, situationsspecifika konsekvenser som det aktuella belysningssystemets energiförluster, ljus och den resulterande värmen leder till.

Ljussättningens situationsanpassning och det resulterande systemets totala effektivitet bestäms till stor del av den optiska lösningen, elsystemet och styrbarheten. Ljussättningens reella flexibilitet är kraftigt beroende av hur elförsörjningen löses. Styrbarheten påverkas av hur man tar nytta av olika former av modern sensorteknik. Det är viktigt att, den manuella och automatiska, styrningen av belysningen utformas på ett användarvänligt sätt. Utvecklingen och konstruktionen av elsystemet har en viktig integrerande, möjliggörande och begränsande, funktion. Det är viktigt att kunna ta fram de el- och styrlösningar man vill ha. Arbete med att definiera elsystem och styrningsbehov är också en intressant möjlighet att öppna upp för dialog som stärker förmågan att tolka användarnas ljusbehov och hur de vill och faktiskt kommer att styra de belysningssystem som installeras.

Den tekniska möjligheten att styra ljuset är beroende av den installerade systemlösningen. Användarens nyttiggörande av den tekniska styrmöjligheten är beroende av att hon/han förstår vilket ljus man bör eftersträva och hur det tekniska systemet fungerar och hur det kan styras. De tekniska möjligheterna är i sin tur beroende av de val som gjordes då man konstruerade belysningssystemet och köpte in de ingående delarna. De valen påverkades i sin tur av kunskapen om användarens olika former av behov av ljus och kunskapen om olika former av tekniska möjligheter och begränsningar. De verkliga valen av olika delar och de resulterande systemeffekterna är beroende av de val som görs av inköpare och installatörer. De valen påverkas av hur specifikationerna görs och hur affärskulturen fungerar. Den här formen av aspekter har blivit mer kritiska eftersom vi de senaste åren har börjat använda ny belysningsteknik på ett mycket mer dynamiskt sätt.

För att komma framåt med nyttiggörandet av de nya möjligheterna är det viktigt att uppdatera begreppsapparaten för beskrivning och specifikation av olika former av ljus. Det är också viktigt att skapa sådana tekniska systemlösningar att man kan se och förstå hur systemen fungerar. Funktioner för övervakning och visualisering av vad som sker har en viktig funktion. Det är också viktigt att kunna modellera och visualisera olika lösningar som ett stöd för design och seriöst affärsmässigt samarbete.

En viktig aspekt är att man talar om livslängder i storleksordningen 50 000 h för lysdioderna, vilket är mer än 5 år om ljuset är tänt hela tiden. Samtidigt utvecklas tekniken i så snabb takt att det kommer flera nya produktgenerationer per år. Detta betyder att logiken förändras. Man kan t.ex. tänka sig att det vore rationellt att uppdatera styr- och övervakningsfunktioner oftare än man byter ljuskällor. Då ljuskällornas elanvändning minskar väsentligt samtidigt som belysningssystemen blir mer komplexa blir det också relativt sett viktigare att begränsa resursanvändningen och miljöbelastningen för tillverkningen av belysningssystemen.

Ljussättning kan utvecklas, från att ha varit baserad på enkel massproducerad teknik, till att i hö-

gre grad bli en mer avancerad teknik för att skapa mer förfinade upplevelsevärden och mer hållbar systemeffektivitet. Det finns en risk att konsumenter missleds till att totalt sett betala mer för ljussättning och systemfunktioner som egentligen inte är bra. Det finns å andra sidan också nya möjligheter för snabba och seriösa affärsaktörer att höja mervärdeskapandet genom att göra användar- och situationsanpassade belysningslösningar. Till en del handlar detta om att aktivera avancerad teknikkunskap och för att klara investeringarna handlar det också om värdeskapande innovation och varumärkesbyggande. Hållbar design av och el- och styrsystem för belysning är en viktig grund i arbetet för en mer funktionell och energieffektiv ljussättning som befrämjar hälsa och välbefinnande.

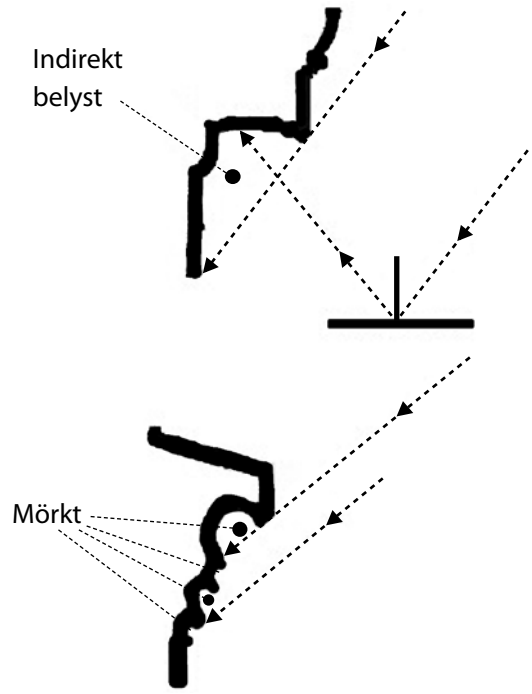
Lunds tekniska högskola har kompetens inom industridesign, med koppling till flera olika former av ergonomisk forskning och ett VR-laboratorium som ger möjlighet att modellera och åskådliggöra olika former av ljussättning. De omfattande erfarenheterna från kontakter med utveckling av elektronik, kommunikations- och informationssystem blir nu också allt mer intressanta i anknytning till utveckling av avancerade belysningssystem.

Dagsljus och arkitektur

Före glödlampans genombrott fanns en välutvecklad ”dagsljusarkitektur”, d.v.s. en arkitektur som tog hänsyn till och drog nytta av dagsljuset. Människan hade generellt sett i huvudsak tillgång till dagsljus för att lysa upp miljön. Ser vi på konsten belystes målningarna i Altamira på samma sätt som da Vincis målningar under renässansen eller Rubens barockmålningar. Beroende på vilken breddgrad man befann sig och vilka krav som ställdes anpassades arkitekturen efter behoven. I nordliga trakter där soldagarna var få använde man sig av höga, stora fönster. Man konstaterade att ett diffust himmelsljus producerade en jämn belysning i miljön. Problemen förknippade med direkt solljus som bländning, skuggor och värmestrålning var av begränsad betydelse och lämnades därhän. När industrialismen fick sitt genombrott blev dock även denna fråga viktig och en arkitektur utvecklades där man i huvudsak hämtade ljuset från fönster orienterade i norr. I miljöer där solljuset är starkt utvecklades en annan typ av arkitektur med ljusinsläpp lågt placerade och nästan inget direkt solljus in i byggnaden.

Var då ljuset tillräckligt? Man var väl medveten om att bristen på ljus måste kompenseras och man anpassade arkitektoniska detaljer till ljussituationen. Reliefer gjordes tydligare och djupare när man hade ett diffust ljus. Ett exempel på detta ses i Figur 28. Man var också medveten om ljusets betydelse för att styra vår perception. Exempel på detta kan ses så långt tillbaka som i egyptiska tempel som t.ex. Abu Simbel som inte har något diffust jämnt ljus utan kolonnaderna blir gradvis mörkare för att möjliggöra en adaptation tills man ser den starkt belysta skulpturen av guden. Upplevelsen blir då överväldigande.

Många menar att det skedde en gradvis utveckling av ”dagsljus-arkitekturen” och att den nådde



Figur 28.
Ljusets samspel med Europas arkitektur. I söder reflekteras mer ljus från marken och i norr står solen lågt, vilket ger skuggor.

sin höjdpunkt under barocktiden, men även så sent som under funktionalismens tidiga period spelade dagsljus en stor roll i arkitekturen. Under modernismens period har mycket av den tidigare uppbyggda kunskapen försvunnit.

I dag ser vi byggnader av samma typ runt om i världen. I norr finns fönsterlösa byggnader och runt Persiska viken kan vi se monumentala glasbyggnader. Dessa ytterligheter leder till ett stort resursslöseri, dels för att lysa upp, men också för att kyla glasbyggnaderna som placerats i en felaktig miljö.

Byggnaden som system

Den kombinerade effekten av dagsljus, solinstrålning och belysning har stor betydelse för inomhusmiljön och energianvändningen. För att undvika suboptimeringar måste byggnaden hanteras som ett mångdimensionellt system.

På grund av högre krav att spara energi för uppvärmning har byggnadsskalet och ventilationssystemen förändrats drastiskt under de senaste åren. Tjockare värmeisolering, nya byggnadsmaterial samt energisnål ventilation med värmeåtervinning har påverkat termiska och hygroskopiska förhållanden och därmed effekten av solinstrålning, dagsljus och belysning.

Bostads- och servicesektorns elanvändning kan delas upp på hushållsel, driftel samt uppvärmning med el. Ett hushåll använder ca 800kWh per år till belysning. Belysning är den enskilt största delen av hushållselen, följt av kyl, frys och hemelektronik. Ungefär fem procent av den el som går till en glödlampa ger ljus, resten omvandlas till värme. Om alla glödlampor byts till lågenergilampor kan elbehovet för belysning minska med 80 procent. Skulle detta få några andra systemeffekter?

Passivhus saknar traditionellt uppvärmningssystem, så den värme som alstras av de boende, elektriska apparater, belysning mm påverkar inomhustemperaturen. I passivhusen räknar vi med en ”gratiseffekt” på några watt per kvadratmeter om man inkluderar personvärme och en viss vintersol. Om de mest effektiva apparaterna och belysningen som finns på marknaden idag används blir det bidraget ca 4 watt per kvadratmeter. När det kommer ännu effektivare system, t.ex LED - belysning, kommer nivån på gratisenergin att sänkas till kanske 2-3 W per kvadratmeter. Den pågående utvecklingen mot mer energieffektiva hushållsmaskiner och belysningslösningar påverkar således byggnaders energibalans. För att de byggnader som projekteras idag ska ge ett tillfredställande inomhusklimat krävs att man tar med effekterna av denna utveckling i planeringen t.ex. genom att redan idag kräva förbättrade termiska egenskaper hos byggnaders klimatskal. Om man agerar proaktivt finns det möjlighet att skapa bättre komfort på ett totalt sett mer energieffektivt sätt.

Stora fönsterareor innebär att värmeförlusterna från en byggnad ökar under uppvärmningssäsongen medan fönstren sommartid kan orsaka övertemperaturer inomhus på grund av solinstrålning. I dagens passivhus är övertemperaturer på sommaren det stora problemet, inte att det blir för kallt på vintern. Samtidigt vill man minska elanvändningen genom att i så hög grad som möjligt ta tillvara dagsljuset. Ytterväggar tenderar att bli tjockare och tjockare för att få plats med tillräckligt med värmeisolering, vilket försvårar möjligheten att få in dagsljuset djupt in i byggnaden. När det gäller bostäder är det framför allt när det är mörkt ute som ljuset behövs, det är förmodligen då de flesta är hemma. Stora fönster bidrar då inte till att få ljust inomhus utan medför snarare att man belyser trädgården.

Genomföringar för installationer är ofta orsak till otätheter med ökad energianvändning och risk för fuktskador och dålig komfort som följd. Värmen i den luft som läcker ut kan inte tillgodogöras i ett värmeåtervinningssystem. Byggnadens lufttäthet påverkar boendekomforten. En luftläcka från ett varmt och fuktigt utrymme inomhus kan under årets kalla dagar ge kondens i byggnadsstommen. I lägen där kondensvattnet kan absorberas av organiska material är risken stor för angrepp av mögel och rötsvampar. Dåligt tätade genomföringar för

installationer har ofta orsakat problem. En vanlig orsak till läckage är att installationer med infällda belysningsarmaturer, strömbrytare och kontakter utförts genom att ett hål skärs upp i takets eller väggens täta skikt, ångspärren. Det år svårt att täta dessa genomföringar effektivt.

Effektiv elanvändning och arbetsmiljö

Belysning är en viktig faktor för att minska den totala energianvändningen (Hanselaer et al. 2007). I de industrialiserade länderna står belysning för 5-15 % av den totala användningen av elektrisk energi, medan det i utvecklingsländer kan vara upp till 86 % (Mills 2002). Trots att belysningstekniken har utvecklats snabbt under de senaste decennierna används fortfarande mycket el till belysning. Det blir allt vanligare med lågenergilampor och elsnåla, flimmerfria T5-lysrör med högfrekvensdon som drar omkring hälften av vad de gamla T8-rören gör. Men enligt STil2-projektet (Energimyndigheten 2010) finns det fortfarande mycket äldre belysning kvar och 2005-2007 gick närmare 30 procent av all elanvändning i kontor, skolor och vårdlokaler till belysning.

Enligt Govén, Bångens & Persson (2002) är belysning en sektor som har en stor potential att spara energi och samtidigt förbättra belysningen, vilket reducerar uppvärmningen, vilket även kan ge bättre inomhusklimat (Borg 2009). Ett av de mest effektiva sätten att reducera energianvändning för artificiell belysning i industri- och kontorsbyggnader är genom att utnyttja dagsljuset (Crisp 1988, via Mardaljevic 2006). För en given belysningsnivå ger ljus från en klar blå himmel det minsta värmetillskottet. Förutom direkt besparing som minskar energianvändningen, får man en indirekt energibesparing genom minskad värmeproduktion och reducerad energianvändning för luftkonditionering. (Hanselaer et al. 2007).

Emellertid resulterar stora fönsterytor ofta i hög solinstrålning och mycket varierande värme- och kylbelastning. (Tzempelikos & Athienitis 2007). Arkitektur med mycket dagsljus kan därför leda till ökad total energianvändning (Mardaljevic, Heschong & Lee 2009). Ett alltför vanligt scenario i inglasade byggnader är att solskyddsanordningar för att kontrollera bländning används samtidigt som belysningen är tänd. Belysning måste därför förstås i ett systemperspektiv tillsammans med andra installationer i byggnaden. Värme, kyla och ventilation påverkas i stor utsträckning av belysningsanläggningarna och driften av belysningssystemet.

Energieffektivitet är en viktig fråga för belysningskonsulter men den måste balanseras gentemot behovet av en väl belyst miljö för att säkra produktivitet, välbefinnande, säkerhet och hälsa (Loe 2009). God belysning kan vara tillfredställande och skapa produktivitet medan dålig belysning skapar otrivsel, trötthet och stress (Küller 2004). En ohälsosam inomhusmiljö leder till en nedgång i produktivitet och även ökad sjukfrånvaro (Fisk 2000, via Bluyssen & Cox 2002). I kontor där den stora kostnaden relateras till de anställda (lön, utbildning, kompetens etc), måste huvudsyftet med belysningen vara att stödja de anställda i deras arbetsuppgifter och att försäkra sig om att de är nöjda med belysningsförhållandena (Boyce et al, 2006). Därför är syftet med kontorsbelysning att maximera de kontorsanställdas arbetstillfredsställelse samtidigt som man minimerar energianvändningen (Boyce et al. 2006).

Genom att utforma byggnader som i högre utsträckning använder sig av dagsljus och uppmärksammar de fördelar naturligt ljus ger kan man uppnå en högre tillfredställelse bland de anställda (Webb 2006). Ljus stimulerar inte enbart vår visuella respons, utan påverkar också vår perception av ett rum, men också vårt känsloläge, motivation och beteende (Goodman et al. 2006; CIE 2004, via Goodman 2009). Många kontorsbyggnader på 1980-talet utformades för att isolera de inre förhållandena från dem på utsidan vilket orsakade kostnader (Voss et al. 2007). Idag försöker man konstruera byggnader där individen får större möjlighet

att kontrollera inomhusklimatet och att ersätta den totala isoleringen från utomhussituationen med en viss interaktion med förhållandena på utsidan.

Hållbar introduktion av ny teknik

Byggande och fastighetsförvaltning är en stor och komplex samhällssektor. För att nyttiggöra den framväxande teknikens potential bör akademin ha aktiv kontakt med branschens verksamhet och utveckling. Det är grundläggande att förstå de förutsättningar som arkitekter, konstruktörer, bygg- och elkonsulter, installatörer, fastighetsförvaltare, fastighetsägare, hyresvärdar, hyresgäster och boende befinner sig i. Det är också vitalt att förstå samspelet mellan de olika formerna av intressenter och aktörer.

Det är viktigt att integrera kunskap från olika områden och att skapa relationer mellan forskare och praktiker. Den flervetenskapliga kunskapen bör översättas till konkreta beskrivningar för hur man bör bygga och arbeta, vilket görs inom arkitektur, byggnadsteknik, byggnadsfysik och installationsteknik.

För att åstadkomma en lösning som verkligen blir bra för brukarna är det grundläggande att utgå från användarnas behov. Det är också viktigt att ”höja blicken” till att tänka på bygganden som en helhet så att man inte bygger fast sig i ofullkomliga lösningar som sedan drar mycket resurser. För att möjliggöra en hållbar introduktion av den nya belysningstekniken är det viktigt att utgå från en helhetssyn på ”Byggnaden som system”.

Det är viktigt att tänka långsiktigt och ta hänsyn till indirekta effekter. Om förnyelsen av belysningsbranschen startar på ett ogenomtänkt sätt så tenderar man att fastna dåliga systemlösningar och reaktiva tankesätt. Om man från början väljer en dålig systemlösning så fastnar man sedan i att lägga mycket resurser på reparationer och korrigeringar som ändå inte leder till någon nämnvärd förbättring av systemets grundläggande struktur. För att stimulera till hållbar utveckling av belysningssektorn bör man tydliggöra användarnas behov på sådana sätt att användarnas intressen blir vägledande i affärsutvecklingsprocessen. De tillverkande företagen är vana att företräda sina intressen, medan användarna oftast inte är organiserade och tränade på att aktivt kunna föra fram sina intressen. Det är därför viktigt att arrangera kompetenscentrat på ett sådant sätt så att användarperspektivet kommer med på ett lämpligt och tillräckligt betonat sätt.

10
SLUTSATS

Under ljusgruppens tvärvetenskapliga dialoger har vi noterat att de olika ämnesområdenas ljusrelaterade frågeställningar tycks ha en gemensam bas i att grundämnena och de grundläggande fysiska processerna ofta är likartade. Språkbruket skiljer sig dock mellan de olika ämnesområdena. Det är tänkvärt att växtbiologer talar om antalet fotoner på olika energinivåer, medan begreppsbildningen för hur ljus påverkar människor är mycket mer rudimentär, ofta bara W, ibland lumen och färgtemperatur. När det gäller växter har man kommit längre i att börja tillämpa ny kunskap om ljus. Rationellt sett ligger skillnaden i att det är mer gripbart att tolka hur olika våglängder påverkar växter. Det är mycket svårare att klargöra hur olika former av ljus och oljus påverkar människor.

Den här skriften illustrerar att det växer fram allt mer kunskap om att ljuset är essentiellt för människans välbefinnande, både visuellt och ickevisuellt. Ljusets energi och information är grundläggande för de fotokemiska reaktioner och sinnesintryck som möjliggör alla former av liv. De senaste decennierna har det vuxit fram betydelsefull kunskap om behoven och nyttan av bra ljus och negativa effekter av oljus. Det finns nu också tekniska möjligheter att skapa ett situationsanpassat och dynamiskt ljus på allt mer förfinade sätt, t.ex. med lysdioder. För att svenska företag skall kunna ta lönsamma roller i att åstadkomma en hållbar utveckling av belysningsbranschen är det viktigt att ta ledande roller i att integrera och översätta den framväxande ljuskunskapen till vägledande och motiverande begreppsbildning. För att skapa hållbara förutsättningar för hälsa och livskvalitet är det angeläget att bygga och nyttiggöra flervetenskaplig kunskap om ljus i samspel med utvecklingen av samhällets fysiska miljö.

LITTERATUR OCH REFERENSER

Abbasi, N.R. et al. (2004) Early diagnosis of cutaneous melanoma: revisiting the ABCD criteria. *JAMA*, 292(22):2771-6.

Asbell, P.A. et al. (2005) Age-related cataract. *Lancet,*18;365(9459):599-609.

Beer, Stafford (1972) *Brain of the Firm*. Allen Lane, The Penguin Press, London

Berson, D.M. et al. (2002) Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. *Science*, 1070-1073

Borg, N. (2009) Guidelines for integrating sustainable summer comfort into public procurement schemes for office equipment and lighting. Keep cool program. *Swedish Energy Agency, 1*

Björn, L.O . (2008) *Photobiology. The Science of Life and Light,* Kluwer Academic Press, Dordrecht

Bluyssen P.M.; C. Cox (2002) Indoor environment quality and upgrading of European office buildings. *Energy and Buildings,* 34:155-162.

Bouchama, A. et al. (2007) Prognostic factors in heat wave related deaths: a meta-analysis. *Arch Intern Med.,* 12;167(20):2170-6.

Boyce P. R.; J.A. Veitch; G.R. Newsham; C.C. Jones; J.M. Heerwagen; M. Myer; C.M. Hunter (2006)Occupant use of switching and dimming controls in offices. *Lighting Research and Technology,* 38: 358-378

Bryant, M.S.; D.H. Rintala; E.C. Lai; E.J. Protas (2010) A pilot study: Influence of visual cue color on freezing gait in persons with Parkinson´s disease. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology,* 5(6):456-61

Chain, C.; D. Dumortier; M. Fontoynont (1999) A comprehensive model of luminance, correlated colour temperature and spectral distributionof skylight: Comparison with experimentaldata. *Solar Energy,* 65, 5: 285-295

Christensen, Clayton M. (1997) *The Innovator's Dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Harvard Business School Press, Boston

Cohen, Robert S.; Marx W. Wartofsky (eds.). *Boston Studies in the Philosophy of Science,* 42. s 378-382 D. Riedel Publishing Company, Dordrecht

Colman, R.S.; F. Frankel; E.Tivro & B.J. Freeman (1976) The effects of flourescent and incandescent illumination upon repetitive behaviours in autistiv children. *Journal of Autism and Childhood Scizophrenia,* 6: 157-162

Cutolo M.; S. Capellino; A. Sulli ; B. Serioli; M.E.Secchi; B.Villaggio; R.H. Straub (2006) Circadian rhythms: glucocorticoids and arthritis. *Annals of the New York Academy of Science,* 1069:289-99.

Damasio, Antonio (2002) *Känslan av att leva: kroppens och känslornas betydelse för medvetenheten.* Natur och kultur, Stockholm,

Darwin, Charles (1998/1872) *The expression of the emotions in man and animals.* Oxford University Press, New York

de Lucas M.; J.M. Davière; M. Rodríguez-Falcón; M. Pontin; J.M. Iglesias-Pedraz, S. Lorrain; C. Fankhauser; M.A. Blázquez; E. Titarenko; S. Prat (2008) A molecular framework for light and gibberellin control of cell elongation. *Nature,* 451: 480-484

Duhem, Pierre (1954). *The aim and structure of physical theory.* (La theorie physique: son objet, sa structure). Princeton University Press, Princeton

Ebi, K.L. & J.A. Paulson (2007) Climate change and children. *Pediatric Clinics of North America,* 54 (2):213-26, vii.

Føllesdal, Dagfinn (2001) *Argumentationsteori, språk och vetenskapsfilosofi.* Thales, Stockholm,

Gardner Dan (2009) *Risk: The Science and Politics of Fear.* Virgin Books, London

Gibbons, M.; C. Limoges; H. Nowotny; S. Schwartzman; P. Scott; M. Trow (1994) *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*. Sage, London.

Goodman, T.M.; D.R. Gibbs; G. Cook (2006) Better lighting for improved human performance, health and well-being and increased energy efficiency - a scoping study for *CIE-UK. NPL Report DQL-OR 019*

Goodman T.M. (2009) Measurement and specification of lighting: a look at the future. *Lighting Research and Technology,* 41: 229-243.

Govén, T.; L. Bångens; B. Persson B. (2002) Preferred luminance distribution in working areas. *Proceedings of Right Light,* 5

Hammond, Deborah (2003) *The Science of Synthesis. Exploring the Social Implications of General Systems Theory.* University Press of Colorado, Boulder

Hansen, O. ; Bengt W. Johansson; Bo Gullberg (1992) Circadian distribution of onset of acute myocardial infarction in subgroups from analysis of 10,791 patients treated in a single center. *American Journal of Cardiology,* 69:1003-1008

Hanselaer P.; C. Lootens; W.R. Ryckaert; G. Deconinck; P. Rombauts (2007) Power density targets for efficient lighting of interior task areas. *Lighting Research and Technology,* 39 (2): 171-184.

Haupt C.M. et al. (2008) The relation of exposure to shift work with atherosclerosis and myocardial infarction in a general population. *Athrosclerosis,* 201(1):205-11.

Hisamatsu, T. et al. (2007)Psychological aspects of inflammatory bowel disease. *Journal of Gastroenterol,* 42 (Suppl XVII):34-40.

Howland, R.H. (2009) An overview of seasonal affective disorder and its treatment options. *The Physician and Sports Medicine,* 37(4):104-15

Humble, Mats (2007) D-vitaminbrist kanske vanligare än vi trott. Prevention och behandling skulle kunna ge oanade folkhälsoeffekter. *Läkartidningen,* 104(11): 853-7

Hutcheon, Pat Duffy (1996) *Leaving the Cave. Evolutionary Naturalism in Socio-Scientific Thought.* Wilfrid Laurier University Press, Waterloo, Onatario

Johansson, Frans (2005) *Medicieffekten – Revolutionerande insikter i skärningspunkten mellan idéer, begrepp & kulturer.* BookHouse Editions AB, Stockholm

Jönsson, G. & E. Nilsson (2009) *Våglära och optik.* Teach Support, Lund.

Kallen, H.M. (1946) The meanings of "unity" among the sciences, once more. *Philosophy and Phenomenological Research,* 6(4): 493-496.

Karlsson, Reine; Mikael Backman; AnnaKarin Djupenström (2010) Sustainability Considerations and Triple-Helix Collaboration in Regional Innovation Systems. In Sarkis, J. et al. (2010) *Facilitating Sustainable Innovation through Collaboration in a Multi-Stakeholder Perspective*. Springer

Kim, W.Y. et al. (2007) ZEITLUPE is a circadian photoreceptor stabilized by GIGANTEA in blue light. *Nature,* 449: 356-360

Kruithof, Arie Andries (1941) Tubular Luminescence Lamps for General Illumination. *Philips Technical Review,* 6 (3): 65–96.

Kuhn, Thomas (1962) *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press, Chicago

Küller Rikard (2004) Planning for good indoor lighting. *Building issues*, Vol. 14. Lund University. Housing Development and Management, Lund

Küller, Rikard; Seifeddin Ballal; Thorbjörn Laike; Byron Mikellides; Graciela Tonellod (2006) The impact of light and colour on psychological mood: a cross-cultural study of indoor work environments. *Ergonomics,* 49(14): 1496–1507

Land, M.F. & D-E Nilsson (2002) *Animal eyes*. Oxford University Press, Oxford

Lenton, T.M; H. Held, E. Kriegler; J.W. Hall; W. Lucht; S. Rahmstorf; H.J. Schellnhuber (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS,* 105(6):1786-1793.

Lin, R; L. Ding; C. Casola; D.R Ripoll; C. Fes-

chotte; H. Wang (2007) Transposase-derived transcription factors regulate light signaling in Arabidopsis. *Science,* 318:1302-1305

Liu H; X Yu; K. Li; J. Klejnot; H. Yang; D. Lisiero; C. Lin (2008) Photoexcited CRY2 Interacts with CIB1 to Regulate Transcription and Floral Initiation in Arabidopsis. *Science,* 322:1535-1539

Loe D. (2009) Energy efficiency in lighting – considerations and possibilities. *Lighting Research and Technology,* 41:209-218.

Lythgoe, J.N. (1979) *The Ecology of Vision.* Oxford University Press, New York

Mardaljevic J; L. Heschong; E. Lee (2009) Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research and Technology,* 41:261-283.

Mardaljevic J. (2006). Examples of Climate-Based Daylight Modelling. Paper no. 67. *CIBSE National Conference,* Engineering the Future. Oval Criquet Ground, London

Maturana; Humberto; Varela; Francisco (1973) *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. In: Robert S Cohen & Marx W. Wartofsky (eds.). *Boston Studies in the Philosophy of Science,* 42. s 378-382 D. Riedel Publishing Company, Dordrecht

McDonough, William & Michael Braungart, (2002) *Cradle to Cradle: Remaking the Way We*
Make Things. North Point Press, San Francisco

Menter, A. et al. (2010) Guidelines of care for the management of psoriasis and psoriatic arthritis: Section 5. Guidelines of care for the treatment of psoriasis with phototherapy and photochemotherapy. *Journal of the American Academy of Dermatology,* 62(1):114-35.

Mezirow J. (ed) (2000) *Learning as Transformation*. Jossey-Bass, San Francisco

Mills E. (2002) Why we're here: the $230-billion global lighting energy bill: *Proceedings of Right Light,* 5: 369–85.

Moore, Gordon E. (1965) Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics,* April 19: 114-17

Moser, M.; R. Penter; M. Fruehwirth; T. Kenner (2006) Why life oscillates-biological rhythms and health. Conference Proceedings - *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,* 1:424-8.

Nowotny, H.; P. Scott; M. Gibbons (2001) *Rethinking science: Knowledge and The Public in an Age of Uncertainty.* Sage, London.

Porter, T. & B. Mikellides. (Eds). *Colour for Architecture Today.* Taylor and Francis, Oxford

Rosenthal N.E.; D.A. Sack; J.C. Gillin; A.J. Lewy; F.K. Goodwin; Y. Davenport, P.S. Mueller; D.A. Newsome; T.A Wehr (1984) Seasonal affective disorder. A description of the syndrome and preliminary findings with light therapy. *Archives of General Psychiatry,* 41: 72-80

Sarkis, J. et al. (2010) *Facilitating Sustainable Innovation through Collaboration in a Multi-Stakeholder Perspective*. Springer,

Schubert E.F. (2006) *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press, Cambridge

Sintonen, M. (1990) Basic and applied sciences—can the distinction (still) be drawn? *Science Studies* 2: 23-31.

Stermann, John (2000) *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World,* McGraw-Hill, Boston

Söderberg, Hjalmar (1901/2005) *Martin Bircks ungdom.* Albert Bonniers Förlag, Stockholm

Tanizaki, Junichiro (1933/1998) *Till skuggornas lov*. Ellerströms, Lund

Tashakkori, A. & Teddlie, C. (eds.) (2003) *Handbook of mixed methods.* Sage,Thousand Oaks

Taiz, L. & Zeiger, E. (eds) (2010) *Plant Physiology.* Sinauer Association, Sunderland

Tzempelikos A. & Athienitis A. K. (2007) The impact of shading design and control on buiding cooling and lighting demand. *Solar Energy*, 81: 369-382.

Voss K.; S. Herkel; J. Pfafferott; G.Löhnert; A. Wagner (2007) Energy efficient office buildings with passive cooling – Results and experiences from a research and demonstration programmes. *Solar Energy,* 81: 424-434.

Wandell, B.A. (1995) *Foundations of Vision.* Sinauer Association, Sunderland

Webb, A.R. (2006) Considerations for lighting

in the built environment: Non-visual effects of light: *Energy and buildings,* 38: 721-727

Wilkins, A.J., I.Nimmo-Smith, A.I. Slater & L.Bedocs (1989) Fluorescent lighting headaches and eyestrain, *Lighting Research and Technology,* 21:11-18

Övrig litteratur

Som hänvisning till den vetenskapliga bas på vilken denna populärvetenskapligt hållna skrift vilar, liksom för vidare studier och fördjupning rekommenderas även följande läsning:

Tvärvetenskap

Huutoniemi, K.; J.T. Klein; H. Bruun; J. Hukkinen (2010) Analyzing interdisciplinarity: Typology and indicators. *Research Policy,* 39: 79-88.

Neurath, O. (1946) The orchestration of the sciences by the encyclopedism of logical empiricism. *Philosophy and Phenomenological Research* 6(4): 496-508.

Växtbiologi

Björn, Lars-Olof (2008) *Photobiology, the Science of Light and Life.* Kluwer Academic Press, Dordrecht

Johnson, G. (2006) *Photosynthesis: ecology*, www.els.net

Möglich, A.; X. Yang; R.A. Ayers; K. Moffat (2010) Structure and function of plant photoreceptors, *Annual Review of Plant Biology* 61:21-47

Ort, D.R. (2009) *Photosynthesis,* www.els.net

Medicin

Moltchanova, E.V. et al. (2009) Epidemiology. Seasonal variation of diagnosis of type 1

diabetes mellitus in children worldwide. *Diabetic Medicine,* 26:673-8.

Newsome, D.A. & T.A. Wehr (1984) Seasonal affective disorder. A description of the syndrome and preliminary findings with light therapy. *Archives of General Psychiatry,* 41: 72-80

Stewart, S.; K. McIntyre; S. Capewell; J. McMurray (2002) Heart Failure in a Cold Climate. Seasonal Variation in Heart Failure-Related Morbidity and Mortality. *Journal of the American College of Cardiology,* 760-766

Terman, M; A.J. Lewy ; D.J Dijk; Z. Boulos; C.I. Eastman, S.S. Campell (1995) Light treatment for sleep disorders: Consensus report IV. Sleep phase and duration disturbances. *Journal of Biological Rhythms*, 10: 135-147

Miljöpsykologi

Boyce, Peter (2003) *Human factors in lighting.* Taylor and Francis, New York

Küller, Rikard (2008) Light, Mood and Seasonal Disorders. In: T. Porter & B. Mikellides. (Eds). *Colour for Architecture Today.* pp. 138-142. Taylor and Francis, Oxford

Porter, T. & B. Mikellides (eds). *Colour for Architecture Today.* Taylor and Francis, Oxford

Psykologi

Brainard, G.C. & J.P Hanifin (2005) Photons, Clocks, and Consciousness. *Journal of biological rhythms,* 20 (4):314-325

(*De två artiklarna som nämns nedan fokuserar på en form av psykisk påverkan som också har fysiologiska aspekter*).

Kalbitzer Jan; David Erritzoe; Klaus K. Holst; Finn Å. Nielsen; Lisbeth Marner; Szabolcs Lehel; Tine Arentzen; Terry L. Jernigan; Gitte M. Knudsen (2010) Seasonal Changes in Brain Serotonin Transporter Binding in Short Serotonin Transporter Linked Polymorphic Region-Allele Carriers but Not in Long-Allele Homozygotes, *Biological Psychiatry,* 67:1033–1039

Sullivan Brianna & Tabitha W. Payne (2007) Af-

fective Disorders and Cognitive Failures: A Comparison of Seasonal and Nonseasonal Depression *American Journal of Psychiatry* 164:1663-1667

Estetik

Baumgarten, Alexander Gottlieb (1983 /two volumes, 1750-58) Aesthetica. Reprint in *Alexander Baumgarten Theoretische Ästhetik,* Grossetese, Robert : De luce. On the "metaphysics of light." Hamburg

Grosseteste, Robert (2000/ ca 1220 – 1235). De Luce. On the metaphysics of light. In: McEvoy, James (2000). *Robert Grosseteste*. Oxford University Press, New York

Kant, Immanuel (2003/1790) *Kritik av omdömeskraften.* Thales, Stockholm

Levin, David Michael (ed.) (1993) *Modernity and the Hegemony of Vision*. Berkely, Los Angeles

McEvoy, James (2000). *Robert Grosseteste*. Oxford University Press, New York

Mirzoeff, Nicholas (ed.) (1998). *The Visual Culture Reader.* Routledge, London

Ruskin, John (2001/ 1849) *The Seven Lamps of Architecture*. Electric Book Co, London

von Goethe, Johann Wolfgang (1979) *Färglära*. Kosmos, Järna

Fysik

Jönsson, G. & E. Nilsson (2009) *Våglära och optik,* Teach Support, ISBN 9789197249966

Grundläggande om LED: http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/basics.html

Lunds universitet gör stora satsningar på materialvetenskap och den ljusrelaterade halvledartekniken är en intressant del. De nedanstående webreferenserna ger en bild av hur satsningen ser ut och vilken ljuskoppling den har.

National Academy of Sciences, *Free Electron Lasers and other Advanced Sources of Light* (Elektronisk), Tillgänglig: http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=NI000099 (20100730)

MaxIV, Tillgänglig: http://www.maxlab.lu.se/maxlab/max4/index.html (20100730)

Lund Vision Group, Tillgänglig: http://www.lu.se/vision-group/research (20100730)

The Nanometer Structure Consortium, Tillgänglig: http://www.nano.lth.se (20100730)

Centre for Combustion Science and Technology, Tillgänglig: http://www.cecost.lth.se (20100730)

Lund Laser Centre, Tillgänglig: http://www-llc.fysik.lth.se/ (20100730)

Photosynthesis, Tillgänglig: http://www.chemphys.lu.se/research/subjects/photosynt/

Teknik och teknikutveckling

Energimyndigheten (2010) Energin i våra lokaler. Energi i kontor, skolor och vårdlokaler. *Resultat från Energimyndighetens STil2-projekt, Delrapport från Energimyndighetens projekt Förbättrad energistatistik i samhället.* ET2010:08, Energimyndigheten, Eskilstuna.

Moore, Gordon E. (1965) Cramming more components onto integrated circuits, Electronics Magazine, pp. 4. ftp://download.intel.com/museum/Moores_Law/Articles-Press_Releases/Gordon_Moore_1965_Article.pdf.

Stermann, John (2000) Business Dynamics - Systems Thinking and Modeling for a Complex World