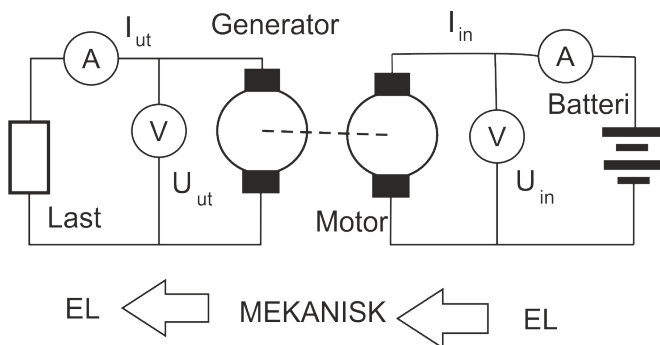
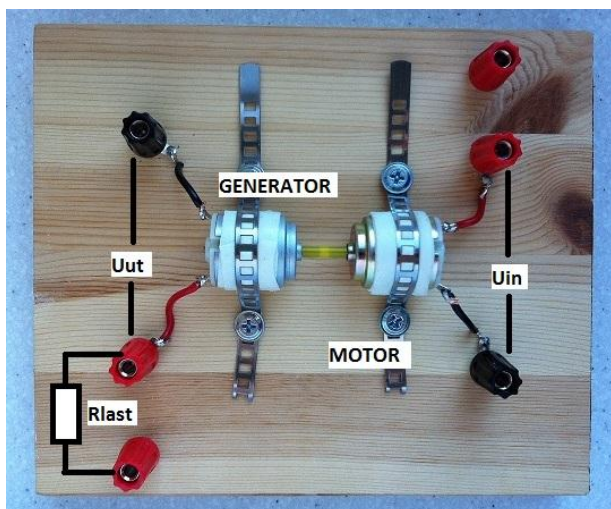


WORKSHOP: EFFEKTIVITET OCH ENERGIOMVANDLING

Energin i vinden som blåser, vattnet som strömmar, eller i solens strålar, måste omvandlas till en mera användbar form innan vi kan använda den. Tyvärr finns det ingen energiomvandling som sker med en 100%-ig effektivitet, utan vi har alltid förluster. Så kommer t.ex. endast $\approx 15\%$ av energin i den bensin du tankar din bil med att omvandlas till det du vill, dvs. till rörelseenergi hos bilen. Av dina betalade 1,60 € per liter, så gör alltså 1,35 € ingen nytta. Målet med denna workshop är att studera effektiviteten i ett antal olika energiomvandlingar.

1. ELMOTORN OCH ELGENERATORN

Elmotorn och elgeneratorn är två av de viktigaste uppfinningarna som driver dagens samhälle. Båda finns i en mängd olika utföranden, men vi skall undersöka likströmsmaskinen i denna workshop. En likströmsgenerator och en likströmsmotor är byggda på samma sätt, varför en motor kan användas som generator och tvärtom (se bilaga A för mer detaljer). I vår mätning skall vi använda oss av två, små och identiska likströmsmotorer (kostar ett par euro styck). Den ena arbetar som motor och driver den andra, som jobbar som generator. Målet är att mäta effektiviteten med vilken energi omvandlas från elektrisk till mekanisk och tillbaka till elektrisk energi. Försökupställningen visas nedan. Effekten in (P_{in}) bestäms genom att mäta strömmen till motorn (I_{in}) och spänningen över motorn (U_{in}) $\rightarrow P_{in} = U_{in} \cdot I_{in}$. Effekten ut bestäms analogt.



Tabell över mätresultat ($R_{last} = 20 \Omega$). Spänningen U_{in} varieras och därmed varvtalet.

U_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	U_{ut} (V)	I_{ut} (A)	P_{ut} (W)	Effektivitet*

*Se kommentarerna på nästa sida för hur effektiviteten beräknas.

Beräkning av effektiviteten

Effektiviteten (η) hos en energiomvandling definieras som effekt ut/effekt in, dvs. $\eta = P_{ut}/P_{in}$. I vår mätning har vi två energiomvandlingar, elektrisk energi $\rightarrow$ mekanisk (motorn) och mekanisk energi $\rightarrow$ elektrisk (generatorn). Om motsvarande effektiviteter är $\eta_{el \rightarrow mek}$ och $\eta_{mek \rightarrow el}$, så får vi att $P_{ut} = (\eta_{mek \rightarrow el})(\eta_{el \rightarrow mek})P_{in}$. Eftersom vi använder samma likströmsmaskin i båda stegen, så är $\eta_{el \rightarrow mek} \approx \eta_{mek \rightarrow el} = \eta$ och vi får $P_{ut} = \eta^2 P_{in}$, dvs. effektiviteten hos en energiomvandling blir $\eta = \sqrt{P_{ut}/P_{in}}$. Man bör notera att denna effektivitet inte är konstant utan varierar med varvtal och belastning.

Moderna, stora elgeneratorer, vilka producerar vår el, är av en typ som kallas **synkronmaskiner**. Liksom i likströmsmaskinen, är det ändringen i det magnetiska flödet i en spole som ger upphov till en spänning. I synkronmaskinen är det dock växelspanning som produceras. Effektiviteten hos dessa maskiner är väldigt hög, mellan 98 % till 99 %.

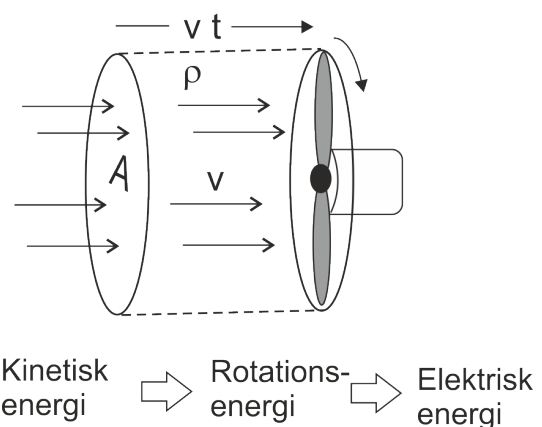
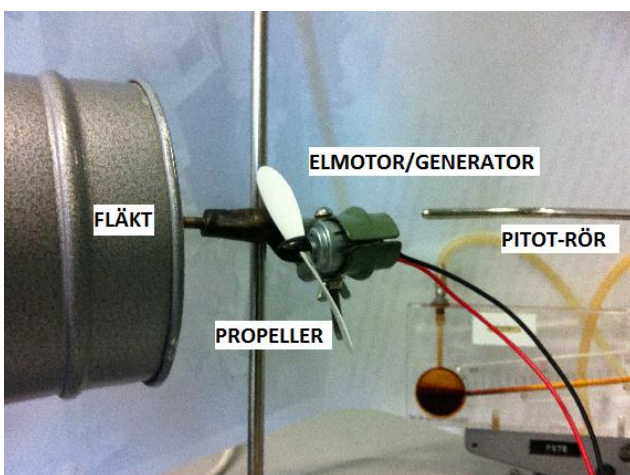
2. VINDENERGI

Vindkraft utnyttjar den kinetiska energin i vinden och omvandlar den till mekanisk energi hos en rotor. Rotorn driver sedan en elgenerator som omvandlar den mekaniska energin till elektrisk energi. I denna workshop skall vi undersöka effektiviteten hos denna energiomvandling. Den kinetiska energin (K) hos en jämt strömmande luftmassa (densitet ρ), som passerar rotorn med hastigheten v på tiden t , ges av (se figuren nere till höger)

$$K_{vind} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}Avt\rho v^2$$

Effekten från vinden blir då maximalt (notera att effekten växer som (vindhastigheten)³)

$$P_{in} = K_{vind}/t = \frac{1}{2}A\rho v^3$$



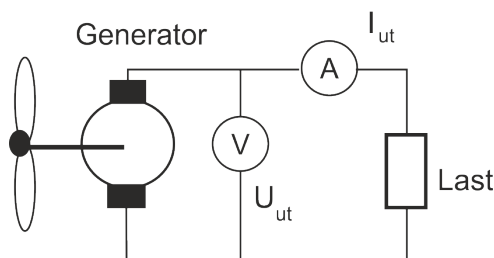
Eftersom energiomvandlingen sker i två steg, så blir den elektriska effekten vi får ut ur generatorn

$$P_{ut} = \eta_{mek \rightarrow el} \cdot \eta_{vind \rightarrow rot} \cdot P_{in}$$

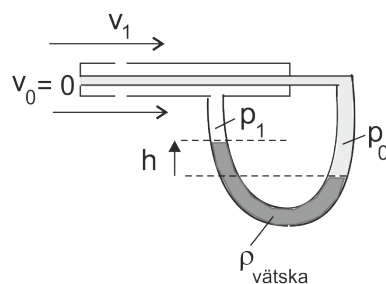
Vi använder samma elmotor/generator som i vår första undersökning, varför vi redan har ett (ungefärligt) värde på $\eta_{mek \rightarrow el}$. Den sökta effektiviteten för omvandlingen från vind till rotationsenergi blir då

$$\eta_{vind \rightarrow rot} = \frac{P_{ut}}{\eta_{mek \rightarrow el} \cdot P_{in}} = \frac{U_{ut} \cdot I_{ut}}{\eta_{mek \rightarrow el} \cdot \frac{1}{2} A \rho v^3}$$

Nedan visas försökssuppkoppling och funktionsprincipen för det s.k. pitot-rör som används för att mäta vindhastigheten från fläkten.



Funktionsprincipen för ett Pitot-rör



Barometerekvationen

$$p_0 - p_1 = \rho_{vatska} g h$$

Bernoullis ekvation

$$p_0 - p_1 = \frac{1}{2} \rho_{luft} v_1^2$$

$$\Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2 \rho_{vatska} g h}{\rho_{luft}}}$$

Tabell över mätresultat ($R_{last} = 20 \Omega$). Fläktens hastighet och därmed vindhastigheten varierar.

h (m)*	V_1 (m/s)*	P_{in} (W)	U_{ut} (V)	I_{ut} (A)	P_{ut} (W)	Effektivitet

*Vindhastigheten mäts med ett pitot-rör, se figuren ovan. Densiteten hos vätskan i barometern är 880 kg/m^3 och luftens densitet $1,2 \text{ kg/m}^3$.

All kinetiska energi hos vinden kan förstås inte utnyttjas (det skulle innebära att vindhastigheten bakom rotern skulle bli noll!). Den teoretiska övre gränsen för effektiviteten hos rotern i ett vindkraftverk, ges av den s.k. Betz lag och ligger på 59 % (se bilaga B). I verkliga, stora vindkraftverk, vilka är optimerade för en viss vindhastighet, kan man nå upp till en effektivitet på 45 % - 50 %.

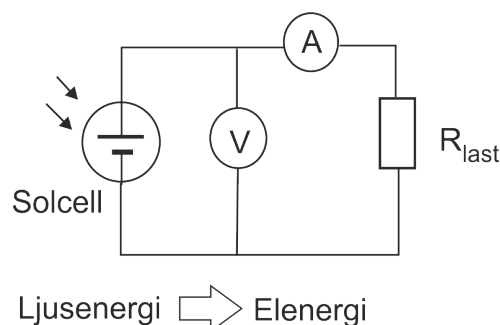
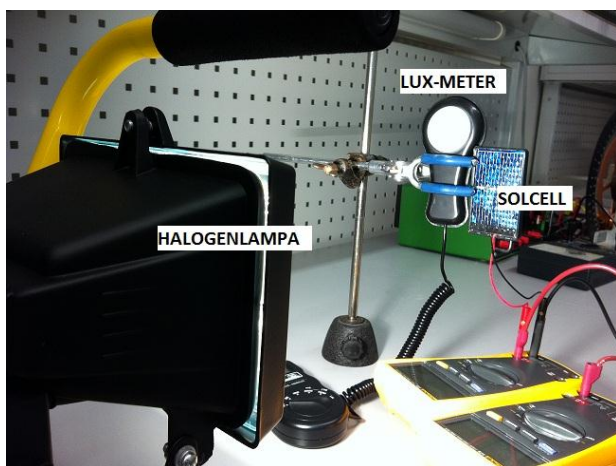
3. SOLCELLER

Solen erbjuder i medeltal 1000 W/m^2 energi för oss att utnyttja. En metod att göra detta är att använda solceller, vilka omvandlar energin hos solens fotoner till en elektrisk energi. Vill man nå en högre spänning än vad en cell kan erbjuda, kopplar man ihop flera solceller till vad som kallas en solpanel. I denna workshop skall vi undersöka effektiviteten hos en solcell gjord av kisel (kisel-solceller är de vanligaste i dagens kommersiella solpaneler). För mer om solceller, se bilaga C.

Effektiviteten hos en solcell beräknas som

$$\eta = \frac{\text{Eleffekten ut}}{\text{Soleffekten in}} = \frac{P_{ut}}{E_{in} \cdot A}$$

där ljusintensitet E_{in} som faller på solcellen mäts i enheten W/m^2 och A är solcellens area i m^2 . Nedan visas mätuppkopplingen.



Tabell över mätresultat (halogenlampa, $R_{last} = 20 \Omega$)

Belysning (lux)	Lampans ljusutbyte* (lm/W)	Ljusintensitet* (W/m^2)	Solcellens area (m^2)	P_{in} (W)	U_{ut} (V)	I_{ut} (A)	P_{ut} (W)	Effektivitet
	~ 17							

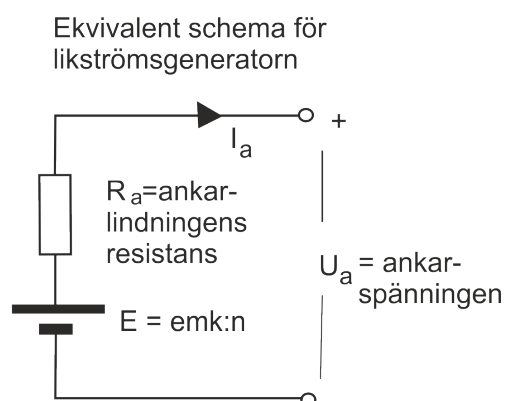
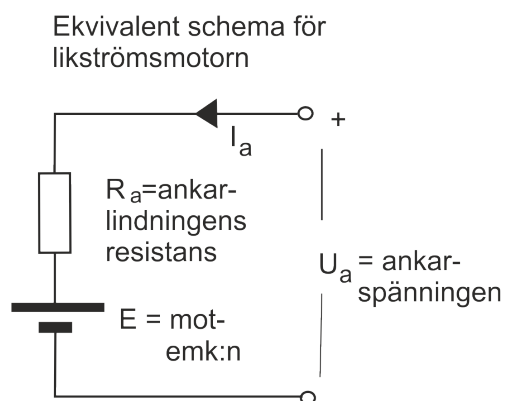
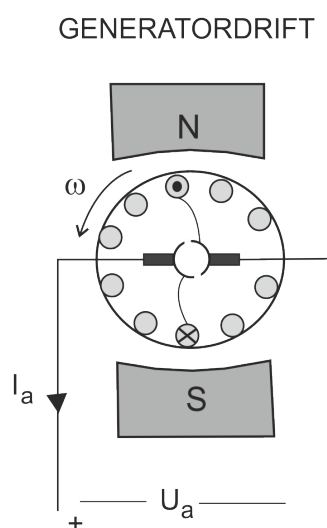
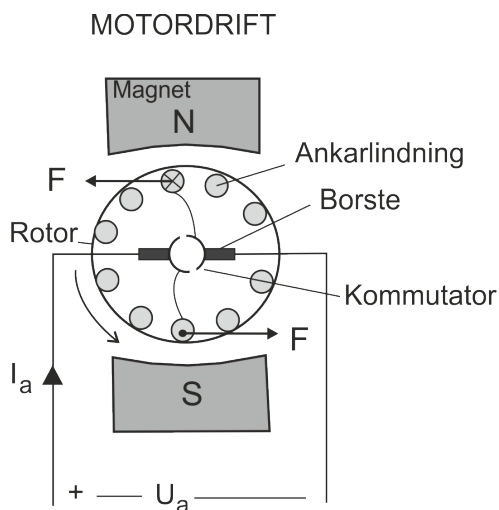
*De flesta billiga ljusmätare (ca. 30 euro från Clas Ohlson) mäter den s.k. belysningen i enheten lux. Vad vi däremot vill veta är ljusintensiteten (W/m^2) som faller in på solcellen. För att omvandla från lux till W/m^2 måste vi känna till ljuskällans ljusutbyte (ges i lm/W). I Wikipedia, sökord "Luminous efficacy", hittar du en tabell med olika ljuskällors ljusutbyte. Ljusintensiteten fås då som

$$E_{in} = \frac{\text{Belysning (lux)}}{\text{Ljusutbyte} \left(\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right)} \quad \therefore 1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$$

En ungefärlig bestämning av en solcells effektivitet kan även göras utan belysningsmätare, om man utnyttjar solen som ljuskälla och har information om solens intensitet vid mätögonblicket.

BILAGA A. Likströmsmaskinen

I bilderna nedan visas en schematisk bild av en likströmsmaskin. Magneterna är i de små motorerna vi använder permanentmagneter, medan de i större elmaskiner är elektromagneter, med en egen strömkrets. Ankarlindningen, i vilken det magnetiska flödet ändrar, är lindad på rotorn. För att tillföra/ta ut elektrisk energi från rotorn används borstar och en kommutator.



Vi ser att vid generatordrift flyter ankarströmmen (I_a) åt samma håll som den inducerade emk:n (E), medan vid motordrift flyter den mot emk:n. Om vi har N stycken ankarledare, alla med längden l längs flödet och vilka rör sig med hastigheten v i (medel) magnetiska flödestätheten B_{medel} , så blir den inducerade emk:n

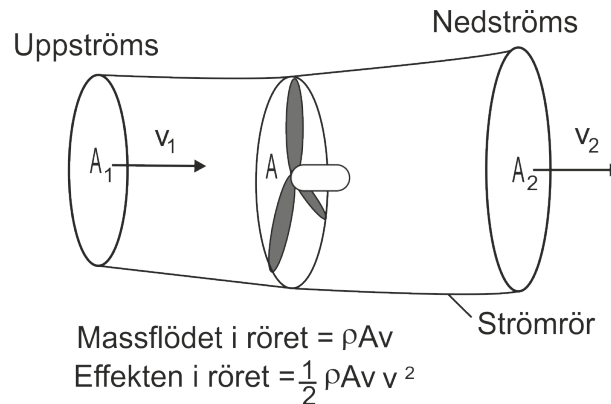
$$E = B_{medel} \cdot N \cdot l \cdot v$$

Förlusterna i energiomvandlingen kommer dels från de resistiva förlusterna i ankarlindningen och borstarna och dels från de mekaniska friktionsförlusterna.

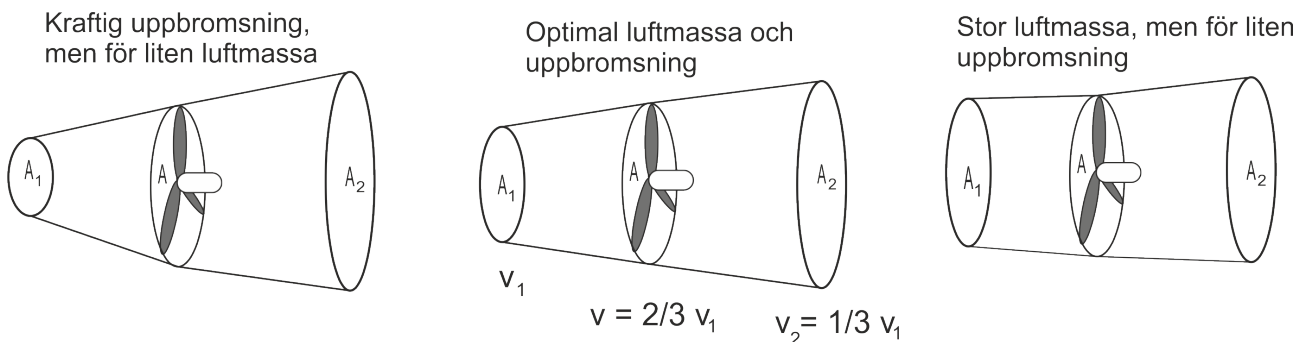
För mer information: Se Wikipedia "Likströmsmotor" och "Generator". En tekniskt detaljerad beskrivning hittar du i boken "Elkraftteknik" av T. Franzén och S. Lundgren.

BILAGA B. Vindenergi och Betz lag

För att studera hur mycket energi som finns i den luftmassa som strömmar förbi vindturbinen, tänker man sig ett strömrör som nått och jämt passerar genom turbinen (se figuren nedan).



Hur effektivt vindens energi utnyttjas, beror på hur mycket vinden bromsas upp av rotorn. Vinden får varken bromsas upp för mycket eller för lite. För att se varför så är fallet, utnyttjar man det faktum (kontinuitetsekvationen) att det måste blåsa lika många kilogram luft per sekund genom ytorna A_1 , A och $A_2 \rightarrow \rho A_1 v_1 = \rho A v = \rho A_2 v_2$. Eftersom hastigheten efter rotorn minskar ($v_1 > v > v_2$), så måste strömrörets tvärsnittsarea öka, dvs. $A_1 < A < A_2$. Hur mycket tvärsnittsarean skall öka har ett optimalt svar (se figuren nedan).

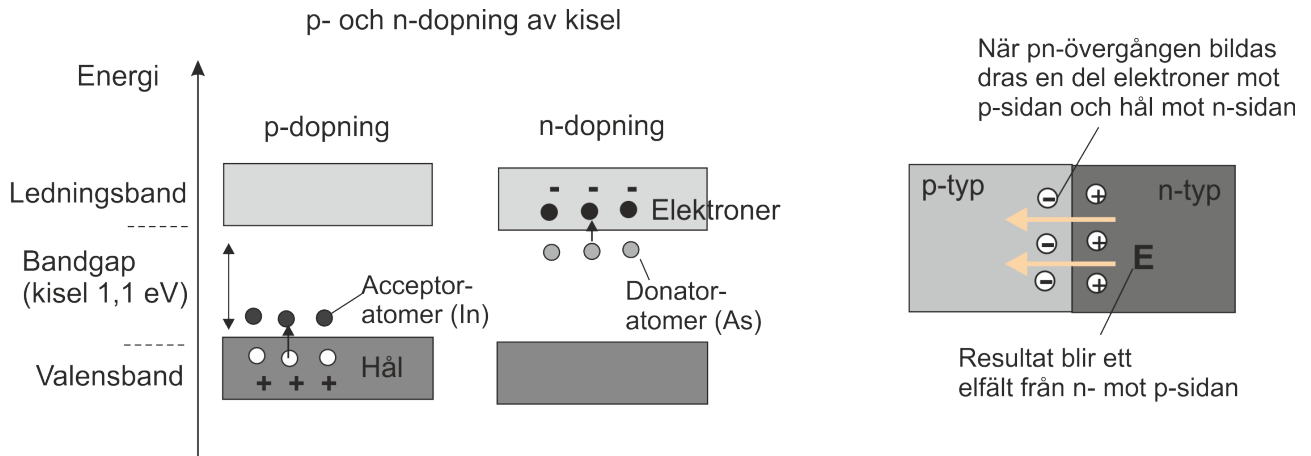


Alfred Betz visade att för att vi skall få en optimal energiomvandling, skall vindhastigheten minska till $\frac{2}{3}$ av den inkommande vindhastigheten vid turbinen och till $\frac{1}{3}$ efter turbinen. Dessa siffror leder till att den teoretiskt maximala andelen av vindens energi som kan utnyttjas är $\frac{16}{27}$, dvs. ca. 59 %. Vi har alltså att den maximala effekten blir $P = \frac{1}{2} \eta \rho A v^3$, där $\eta_{vind \rightarrow rot}^{max} = 0,59$. Hur man i praktiken skall komma så nära som möjligt detta teoretiska maxvärde, är en ingenjörsmässig utmaning, där antalet rotorblad, deras form, dimension, osv. måste optimeras. I dag har man nått över 45% effektivitet (historiskt låg de bästa holländska väderkvarnarna under 20%).

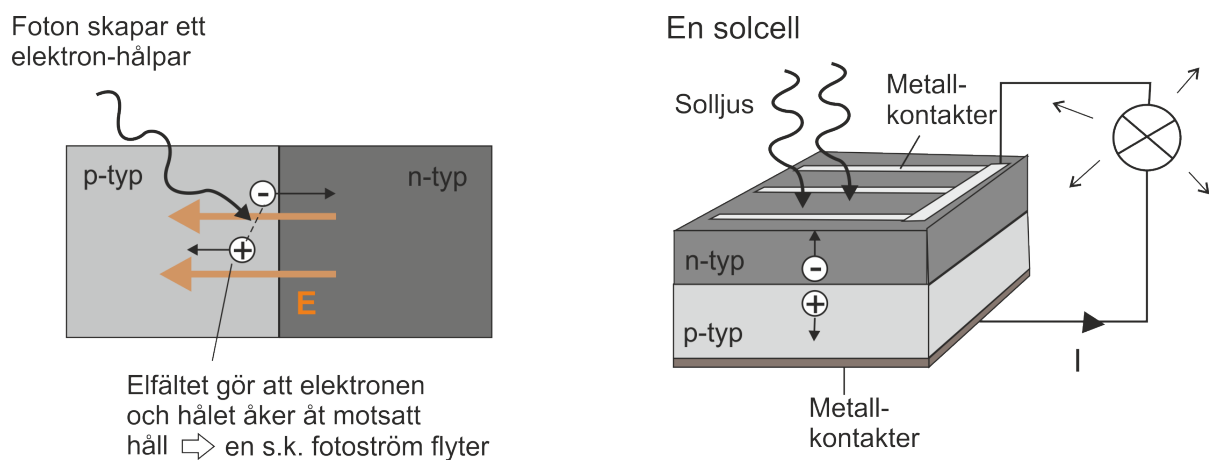
För mer information om vindkraftens olika aspekter, se boken "Vindkraft i teori och praktik", av T. Wizelius. Eller på nätet: www.windpower.org.

BILAGA C. Kiselceller

Kiselceller tillverkas av p- och n-dopad kisel. Dopning innebär att atomer som bidrar med extra negativa laddningar (donator), respektive positiva laddningar (acceptor) förs in i kiselkristallen. De dopade materialen förs samman i en s.k. pn-övergång (se bilden nedan).



Om pn-övergången träffas av ljus med fotoner vars energi överstiger bandgapet (dvs. 1,1 eV), så kan ett elektron-hålpar bildas och en fotoström uppstå. Genom att sätta metallkontakter på båda sidor av pn-övergången, kan laddningarna fångas upp och vi får en spänning som kan driva en ström i en yttre krets (se bilden).



Effektiviteten hos energiomvandlingen från ljus till elektricitet, påverkas av bland annat det faktum att $\frac{1}{4}$ av solstrålningen utgörs av fotoner vars energi är för låg (1,1 eV motsvarar en ljusvåglängd på 1,1 μm , vilket ligger i IR-området). Inte heller varje foton med tillräckligt hög energi absorberas och åstadkommer ett elektron-hålpar. Den teoretiska övre gränsen på effektiviteten är 33% för kisel, men kommersiella solceller, gjorda av polykristallint kisel, har en effektivitet som är högst hälften av detta maxvärde. Utmaningen ligger i att hitta material som har tillräckligt hög effektivitet och som samtidigt är billiga nog att tillverka i de stora mängder som krävs för att täcka stora arealer.

För mer information, Wikipedia "Solar Cells"