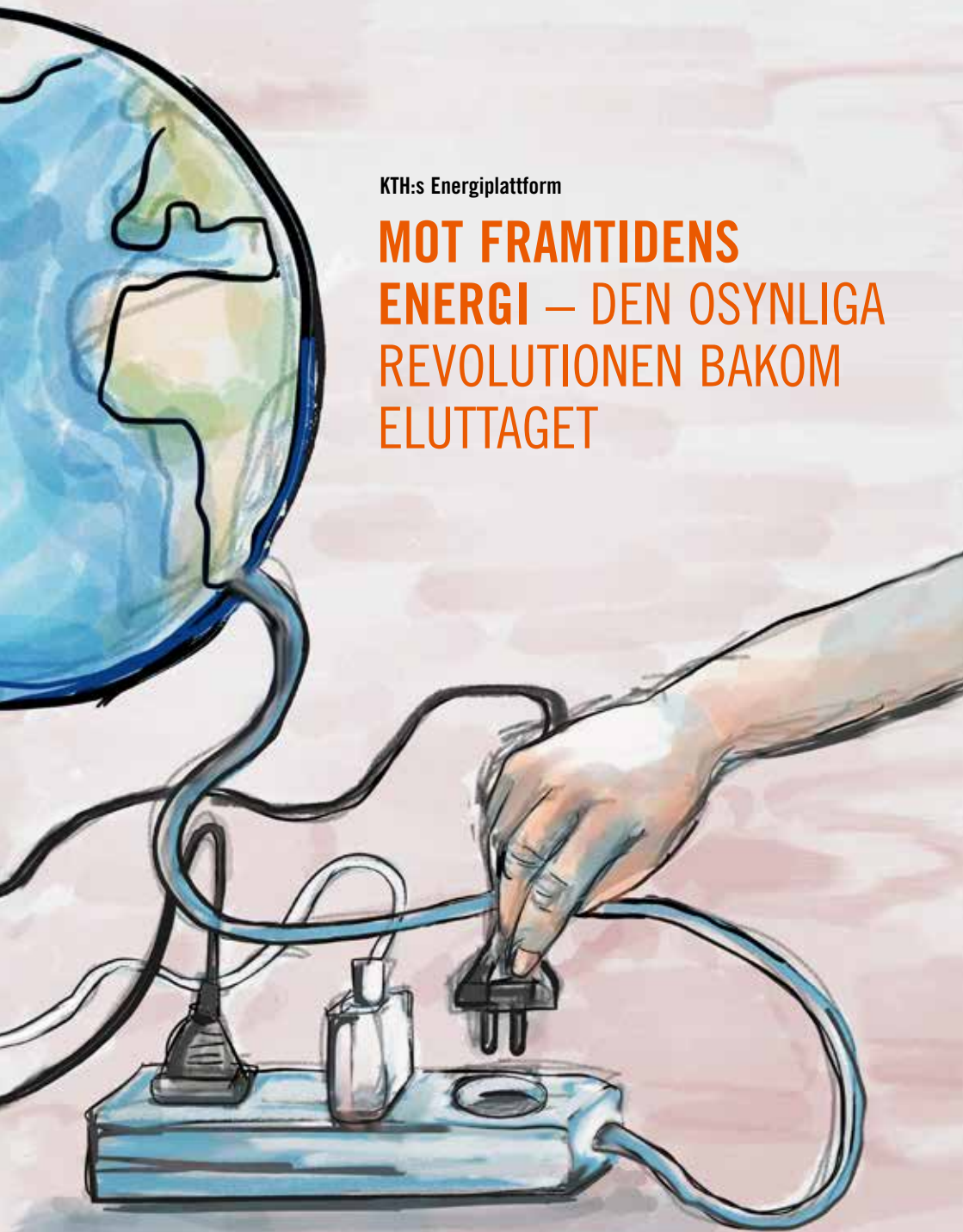


KTH:s Energiplattform

MOT FRAMTIDENS ENERGI – DEN OSYNLIGA REVOLUTIONEN BAKOM ELUTTAGET



Mot framtidens energi
– den osynliga revolutionen
bakom eluttaget

**MOT FRAMTIDENS
ENERGI – DEN OSYNLIGA
REVOLUTIONEN BAKOM
ELUTTAGET**

VA-rapport 2022:2
ISBN 978-91-89039-13-1
Andra upplagan

© Respektive författare, 2022
Redaktörer: Fredrik Brounéus & Christophe Duwig
Illustrationer: Lotta Waesterberg Tomasson
Formgivning: Pelle Isaksson

KTH:s energiplattform

KTH:s energiplattform är en arena för samarbete mellan olika forskargrupper på KTH. Syftet är att skapa och kommunicera kunskap kring energi som kan bidra till ett uthålligt samhälle. En viktig del är att underlätta interaktion mellan experter vid KTH och externa parter. Mer än 450 forskare är anslutna till plattformen. Läs mer på www.kth.se (sök på “energiplattformen”).

Vetenskap & Allmänhet

Vetenskap & Allmänhet, VA, är en ideell organisation som främjar dialog och öppenhet mellan allmänhet och forskare. I arbetet ingår bland annat att inspirera och utbilda forskare till att kommunicera om sin forskning, samt att genomföra dialogaktiviteter och studier om samspelet mellan forskning och samhälle. Läs mer på www.v-a.se.



Illustrationerna i denna antologi är licensierade under en Creative Commons Erkännande-IckeKommersiell-DelaLika 4.0 Internationell Licens.

INNEHÅLL

Förord	9
Vad är energi?.....	13
<i>Matthäus Båbler & Fredrik Brounéus</i>	
Vad är elektricitet?.....	21
<i>Lina Bertling Tjernberg</i>	
Energi i historiskt perspektiv.....	31
<i>Per Högselius</i>	
Ett hållbart samhälle har inte råd att slösa med energi	39
<i>Christophe Duwig</i>	
Globala målen som stöd för utformning av energiprojekt och beslutsfattande.....	45
<i>Francesco Fuso Nerini</i>	
Olja och gas – ett problematiskt beroende	51
<i>Christophe Duwig</i>	
Biomassa – en mångsidig naturresurs.....	57
<i>Henrik Kusar</i>	
Energi från exkret – en av jordens mest rikliga resurser	65
<i>Daniel Ddiba</i>	
Tillbaka till framtiden med vätgas.....	75
<i>Ann Cornell</i>	

Material – en påtaglig utmaning för samhällets elektrifiering.....	87
<i>Kerstin Forsberg & Christopher Hulme</i>	
Uthålliga elkraftnät – en förutsättning för framtidens energisystem	97
<i>Lina Bertling Tjernberg</i>	
Framtidens kärnkraft.....	109
<i>Pär Olsson</i>	
Hemmen i det smarta elnätet.....	117
<i>Cecilia Katzeff</i>	
Sakernas internet – Internet of Things (IoT)	127
<i>Carlo Fischione</i>	
Cybersäkerhet i energisystemet.....	133
<i>Fredrik Heiding</i>	
Författare.....	139

FÖRORD

Energi finns överallt. Den är en oskiljaktig del av våra liv – vad skulle vi göra utan elektricitet, kemikalier eller värme? Trots att vi är fullständigt beroende av den och omges av den vart vi än går, är energin oftast osynlig för oss.

Den här antologin är skriven av forskare anslutna till KTH:s energiplattform, i samarbete med den ideella organisationen Vetenskap & Allmänhet, VA. Plattformen är en arena där vi forskare lär av varandra och skapar nya idéer för att öka kunskapen om vår värld och utmaningarna som vi står inför. Energi är ett oerhört komplext forskningsområde och inte ens de mest lysande forskarna på jorden förstår det till fullo. Men med varandras hjälp för vi kunskapen framåt, varje dag med målet att förstå mer, för världens bästa. Samarbete är vår nyckel till framgång, och energiplattformen en öppen plats där vi kan göra precis det – samarbeta.

För att bromsa klimatförändringarna behöver världens energisystem omvandlas i grunden på bara ett par årtionden. Det kommer att vara en process som saknar historiskt motstycke, där vi inte har någon färdig plan att följa. Som forskare är det vår uppgift att skapa kunskapen som kan göra de nödvändiga förändringarna möjliga. Vi tar inte de politiska besluten, men den vetenskapliga kunskapen kan utgöra grunden för lyckade beslut.

Det kan ofta vara utmanande att diskutera och analysera komplexa problem i samhällsdebatten. Massmedier paketerar diskussionen i slagkraftiga rubriker och korta poänger. I ett polariserat politiskt klimat kan partier överförenkla sina argument för att blidka väljare samtidigt som de ignorerar frågornas komplexitet. Tonen i debatterna känns ofta som raka motsatsen till diskussionerna som vi forskare har med våra kollegor, och

nöjet som vi känner inför att dela och lära av varandras upptäckter och insikter.

Dagens utmaningar kräver en kunskapsdriven omvandling för att skapa ett hållbart samhälle. Alla utmaningarna är komplexa – många av målen står i konflikt med varandra. Detta är anledningen till att vi behöver ta oss an dem tillsammans, i en öppen arena där fakta och kunskap formar vårt arbete. I arbetet måste vi också vara helt öppna med osäkerheten som finns i den här omvandlingen och vart den kommer att leda oss.

Ett demokratiskt samhälle vilar på insatta och engagerade medborgare. Med den här boken vill vi dela med oss av några av komplexiteterna som vi möter i vår forskning. Vår förhoppning är att läsare uppskattar dessa fascinerande forskningsfrågor och får en djupare förståelse för världen och de utmaningar som samhället står inför när det gäller energi.

Kanske hittar du några nya kunskaper att dela med vänner och familj, eller uppslag för intressanta diskussioner på kafferaster, fester eller familjemiddagar? Du är varmt välkommen att tillsammans med oss sprida kunskap och nyfikenhet kring energi, genom att lyfta fakta och ta aktiv del i debatten – var än den äger rum.

Lina Bertling Tjernberg, föreståndare för KTH:s energiplattform
Christophe Duwig, vice föreståndare för KTH:s energiplattform

**MOT FRAMTIDENS
ENERGI – DEN OSYNLIGA
REVOLUTIONEN BAKOM
ELUTTAGET**

VAD ÄR ENERGI?

~~~~~  
*Matthäus Bähler & Fredrik Brounéus*

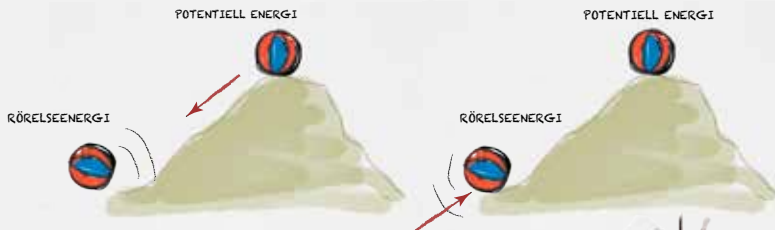
Energi finns överallt, som det står i bokens förord. Den omger oss bokstavligt och fysiskt, vi är fullständigt beroende av den, som en grundläggande del av våra liv. Den värmer upp våra hem, driver våra datorer, mobiltelefoner, hushållsmaskiner, bussar, tåg, flygplan och bilar, i en tillvaro som vilar på ett fungerande energisystem. Våren 2022 blev vi plågsamt påmind om detta, när Rysslands invasion av Ukraina visade hur sammanlänkade och sköra våra globala energirelationer är. Men energi hade en given plats i det offentliga samtalet redan innan dessa geopolitiska aspekter hamnade i fokus. Under de gångna årtiondena har vi nämligen kommit till insikt om att jordens tillgångar är ändliga, och att om vi fortsätter exploatera dem på samma vis som vi har gjort hittills, så blir det till ett högt pris för framtida generationer. Vi har även insett att vi måste skära ner på de fossila bränslen som driver merparten av våra dagliga liv. Annars kommer utsläppen att driva klimatförändringarna till en punkt där vi inte längre har något att sätta emot (läs mer i kapitlet om vårt beroende av olja). Samtidigt växer vår globala människoby, med allt högre levnadsstandard, och med ett allt större behov av energi. När vi talar om levnadsstandard menar vi inte enbart lyx och bekvämligheter, såsom bilar, TV-apparater och semesterresor. Här ingår även grundläggande funktioner i det moderna samhället, såsom sjukvård, kommunikation, utbildning, samt produktion och transport av nödvändiga varor som livsmedel, kläder och byggnadsmaterial.

Men låt oss nu lämna den här dystra tråden en stund, ta ett kliv tillbaka och fråga: Vad är energi? Ur ett naturvetenskapligt

# ENERGI SOM FYSISK Kvantitet

**POTENTIELL ENERGI** - SYSTEMET (BOLLEN) KAN UTFÖRA ARBETE NÄR DEN POTENTIELLA ENERGIN (LÄGEENERGIN) OMVANDLAS TILL **KINETISK ENERGI** (RÖRELSEENERGI), NÄR BOLLEN RULLAR NEDFÖR KULLEN.

FÖR ATT ÅTERSTÄLLA DEN POTENTIELLA ENERGIN BEHÖVER KINETISK ENERGI TILLFÖRAS FÖR ATT RULLA BOLLEN TILLBAKA UPPFÖR KULLEN.



**KEMISK ENERGI** - ENERGI SOM ÄR LAGRAD I KEMISKA BINDNINGAR (T.EX. I BIOMASSA, SOM VED OCH FOSSILA BRÄNSLEN), OCH SOM KAN FRIGÖRAS T.EX. SOM **TERMISK ENERGI** (VÄRME).

LÄS MER I KAPITLEN OM ENERGI FRÅN BIOMASSA, VÄTGAS, EXKRET, RESPEKTIVE ENERGI UR ETT HISTORISKT PERSPEKTIV.



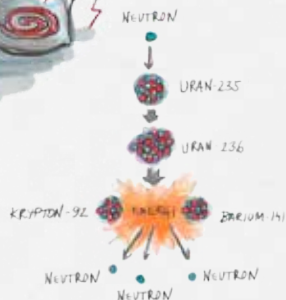
**ELEKTRISK ENERGI** - ENERGI FRÅN RÖRELSE hos de LADDADA PARTIKLARNÄ I ATOMER (T.EX. NÄR ELEKTRONER RÖR SIG GENOM EN ELEKTRISK VATTENKOKARE OCH ALSTRAR VÄRME).

LÄS MER I KAPITLEN OM ELEKTRICITET, FRAMTIDENS ELKRAFTNÄT, RESPEKTIVE MATERIAL FÖR ELEKTRIFIERING AV SAMHÄLLET.



**KÄRNERGI** - ENERGI FRÅN ATOMKÄRNOR (T.EX. VID KLYVNING AV URANKÄRNOR MED HJÄLP AV NEUTRONER).

LÄS MER I KAPITLET OM FRAMTIDENS KÄRNFÖRSTÄRKNING.



perspektiv är energi en *fysisk kvantitet* som definieras som *ett systems förmåga att utföra arbete*. Mer energi innebär alltså en större förmåga att utföra arbete. Energi kan förekomma i flera olika former, såsom elektricitet, värme, rörelse eller strålning (se Figur 1). Om vi istället ser energi ur en ekonomisk och samhällelig synvinkel är den en *handelsvara* som vi kan producera, överföra, handla med och konsumera. Liksom den fysiska kvantiteten förekommer handelsvaran i olika former (t.ex. elektricitet eller värme) när den produceras, överförs, handlas och konsumeras (se Figur 2).

När vi producerar, handlar, transporterar och konsumerar energi i vardagen gör vi det alltid genom att omvandla den från en form till en annan (se kapitel om energi ur ett historiskt perspektiv).

Betraktat som en fysisk kvantitet är energin oförstörbar. Den kan heller inte nybildas – den kan bara omvandlas från en form till en annan. Detta innebär att det finns en bestämd och konstant mängd energi i vårt universum. Som människor kan vi ändå uppleva förluster av energi när vi omvandlar den från en form till en annan, till exempel från värme till elektricitet. Men ur fysikens synvinkel är den bara förlorad i bemärkelsen att vi inte kan fånga in och använda de former förlusterna tar sig (t.ex. spillvärme; läs mer i kapitlet om samhällets slöseri med energi). Sådana förluster beror på grundläggande naturlagar och beskrivs inom *termodynamiken* – den vetenskapliga termen för hur energi, arbete och temperatur förhåller sig till varandra. I praktiken talar vi ofta om *energieffektivitet*, hur effektivt vi kan omvandla en form av energi till en annan. Till exempel är energieffektiviteten hos ett gaskraftverk förhållandet mellan mängden energi som *frigges* (i form av värme när gasen förbränns) och mängden energi som *produceras* (i form av elektricitet).

Kraftverket ger oss ett lägligt tillfälle att se närmare på energi som en handelsvara. Hur går det här tankesättet ihop med att energi är

---

◀ *Figur 1:* Energi som fysisk kvantitet.

# ENERGI SOM HANDELSVARA



- ▲ *Figur 2: Energi som handelsvara. Ett kolkraftverk producerar till exempel energi genom att omvandla kolets kemiska energi, via förbränning, till termisk energi; som därefter, via ånga, omvandlas till kinetisk energi; som via turbinernas mekaniska energi omvandlas till elektrisk energi. Den elektriska energin transporteras via kraftledningar till våra hem där vi återigen omvandlar den när vi konsumerar den för att t.ex. värma upp våra hem, eller för att driva våra bilar (mekanisk energi; kinetisk energi).*

något konstant och oförstörbart? För att förstå förhållandet mellan de två koncepten behöver vi ta planeten jorden som utgångspunkt. När vi befinner oss på jorden så har i stort sett all energi i vår omgivning sitt ursprung i solen och geologisk aktivitet i planetens inre. Energi från solen når jorden i form av elektromagnetisk strålning, som gör det möjligt för träd och växter att gro via fotosyntes. Strålningen utgör även motorn som driver planetens väder. Betraktat som en hållbar energikälla står solen därmed inte bara för strålningen till solkraftverk – den skapar också vind och regn för vindkraft och vattenkraft. Men solen är också ursprunget till fossila bränslen; under miljoner år använde träd och växter solenergi för att växa genom att omvandla och lagra den som kemisk energi. När växterna dog, förmultnade och begravdes omvandlades de – med hjälp av värme från jordens inre – till kol, olja och naturgas (se Figur 3). När vi ser energi som en handelsvara som kan produceras och konsumeras så är det inom planeten jordens gränser, där vi har ett ständigt inflöde av energi i form av solstrålning. Solen förser oss med både hållbara och mindre hållbara energikällor, och tyvärr har vi under alltför lång tid varit alltför förtjusta i de ohållbara (fossila) varianterna.

Med detta är vi tillbaka i den smått apokalyptiska tråd som inledde kapitlet. När vi omvandlar den kemiska energin i fossila bränslen till andra former av energi släpper vi ut växthusgaser i atmosfären. Utifrån vad vi nyligen diskuterade kan man kanske undra varför detta är ett problem. Olja, kol och naturgas är ju naturliga produkter, som har sitt ursprung i solen? Problemet är att den kemiska energin i fossila bränslen, i form av kolväten, har omvandlats från solenergi och geotermisk energi över *miljontals* år. När vi förbränner allt detta kol på bara *några hundra år*, leder det till en enorm obalans i atmosfären.

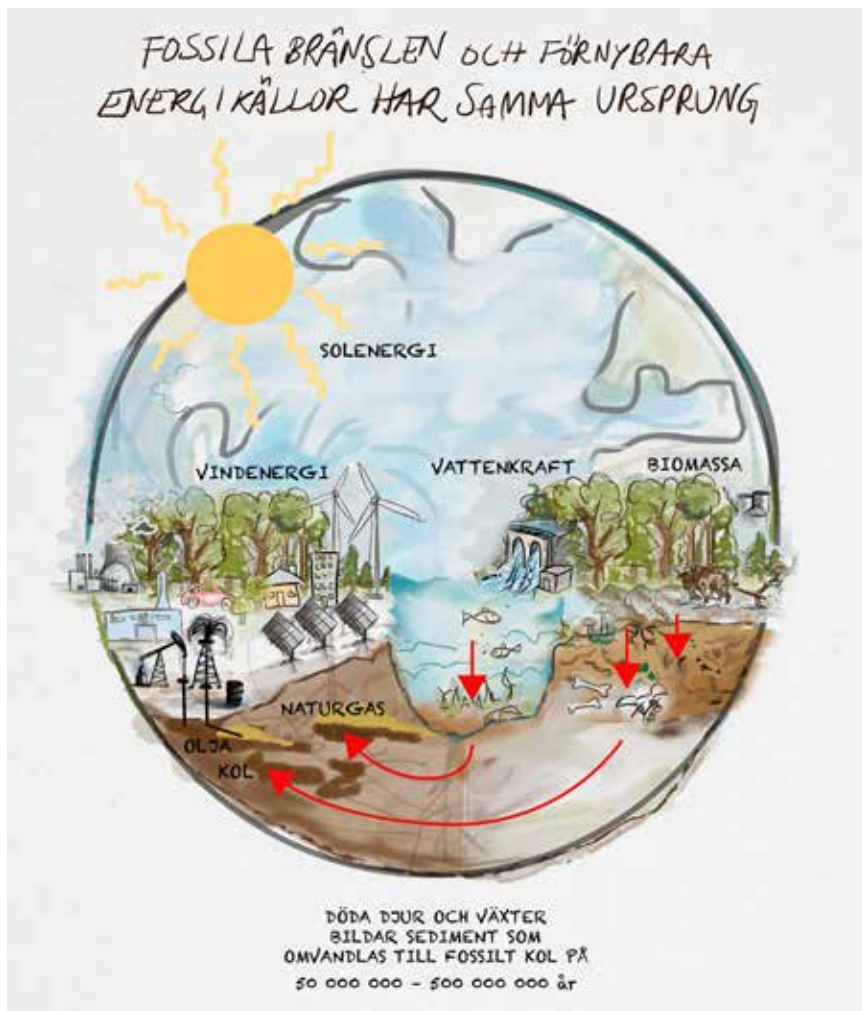
Men skulle vi inte kunna återvinna koldioxiden i atmosfären för att skapa mer energi eller tillverka andra användbara produkter? Med så mycket värdefull kol i luften borde det täcka våra behov för flera generationer framåt. Och vi skulle kunna fortsätta använda



- ▲ *Figur 3:* Om vi ska kunna bilda nya energikällor av koldioxid måste vi först tillföra energi.

fossila bränslen. Dessvärre kommer koldioxiden i atmosfären från kemiska reaktioner som frigör stora mängder värme (t.ex. från kraftverk som bränner naturgas). Kolet i koldioxiden innehåller därför mycket mindre energi jämfört med de ursprungliga molekylerna (återigen termodynamik). I förhållande till fossila bränslen är koldioxid på en mycket låg energinivå. För att återvinna koldioxiden skulle vi behöva tillföra stora mängder energi för att ”hissa upp” slutprodukterna till en högre energinivå (se Figur 3). Detta är dock möjligt att göra, åtminstone i viss utsträckning, med hjälp av förnybar energi.

Ur historisk synvinkel har människans utvinning av energi varit en smutsig och bullrig process, som ofta involverar kemikalier som är skadliga för både oss själva och vår miljö. Idag vet vi att processen



- ▲ *Figur 4:* Förnybara energikällor har samma "föräldrar" som fossila bränslen. Men vi använder olika sätt för att utvinna deras energi, med olika slutresultat.

dessutom är ohållbar – för oss själva och planeten. Energi utgör därför en viktig del av Globala målen (se kapitlet om energi och

Globala målen). För att uppnå målen måste vi hitta nya sätt att omvandla energi för våra behov på hållbara sätt. När vi talar om hållbar energi menar vi energikällor som är så gott som outtömliga på den mänskliga tidsskalan (på en kosmisk tidsskala kommer även solen att slockna) (se Figur 4).

Oavsett hur vi säkrar energibehovet för vårt nutida och framtida samhälle, kommer alla lösningar att medföra avvägningar och synergier. Den pågående elektrifieringen av samhället kommer att leda till nya vägsäl, med nya hållbarhetsproblem (se kapitlet om samhällets elektrifiering). Sådana avvägningar är en naturlig del av alla forsknings- och utvecklingsprocesser. Men till skillnad från tidigare måste vi nu ha en helhetssyn där vi överväger alla möjliga effekter som ny teknologi kan få på oss själva och jorden som helhet. Som tur är har digitaliseringen gjort det möjligt att samla in och analysera enorma mängder data om hela energikedjan, vilket hjälper oss förstå och kontrollera olika delar av energisystemet. På så vis kan vi använda artificiell intelligens för att utforma och testa nya scenarier, vilket underlättar övergången till en hållbar framtid (se kapitlet om vårt nuvarande slöseri med energi). Men även denna utveckling kommer att medföra nya utmaningar som vi behöver ha i åtanke (se kapitlen om sakernas internet, smarta hem, cybersäkerhet, respektive framtidens elkraftnät).

I jakten på en hållbar energiframtid kanske vi även behöver ställa frågan om det är möjligt att koppla isär begreppen *energikonsumtion* och *ekonomisk tillväxt*. Med andra ord: Skulle vi kunna förbättra vårt samhälle utan att förbruka mer energi? Kanske behöver vi också koppla isär vår uppfattning om *ekonomisk tillväxt* och *mänsklig utveckling*. Finns det en punkt där mindre faktiskt är mer – även när det gäller produktion och konsumtion av energi?



# VAD ÄR ELEKTRICITET?

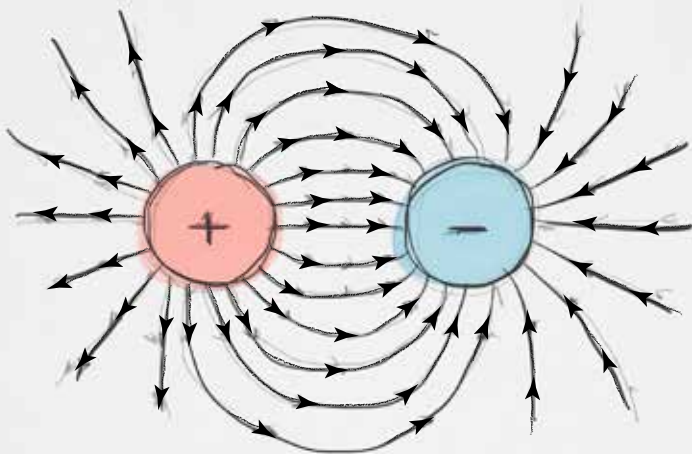
~~~~~  
Lina Bertling Tjernberg

Elektriska fenomen är en naturkraft som har studerats ända sedan antiken. En tidig upptäckt var statisk elektricitet som uppstod när ett pälskinn gnuggades mot bärnsten. Ordet elektricitet kommer från latinets *electricus* och grekiskans *electron* som båda betyder just bärnsten. De stora vetenskapliga genombrotten kring elektricitet skedde dock inte förrän på 1700- och 1800-talet, och de praktiska tillämpningarna dröjde till slutet av 1800-talet. Idag är vi helt beroende av elektricitet för en mängd olika användningsområden, som exempelvis belysning, transport, uppvärmning, kommunikation och matematiska beräkningar.

Hur uppstår då elektricitet? En atom består av ett antal mindre partiklar med motsatta laddningar som hålls samman tack vare sin elektriska dragning till varandra. Atomens kärna innehåller *protoner* med positiv elektrisk laddning och *neutroner* som saknar laddning, och omges av *elektroner* med negativ laddning. En atom med samma antal protoner som elektroner är elektriskt neutral. Friktion – som när ett pälskinn gnuggas mot bärnsten – kan få elektroner att förflyttas från ett material till ett annat. Materialet som får ett *överskott* av elektroner (i det här fallet bärnstenen) blir negativt laddat och materialet med *underskott* av elektroner (pälskinnnet) blir positivt laddat. Mellan dessa positiva och negativa laddningar uppstår ett *elektriskt fält* – ju större skillnad i laddning, desto högre spänning i fältet (se Figur 1). Spänning mäts i enheten volt [V].

En *elektrisk ström* uppstår när elektroner rör sig från en punkt till en annan. Rörelsens storlek – strömstyrkan – mäts i enheten ampere [A]. Elektriska apparater drivs av denna ström av elektroner.

ELEKTRISK LADDNING

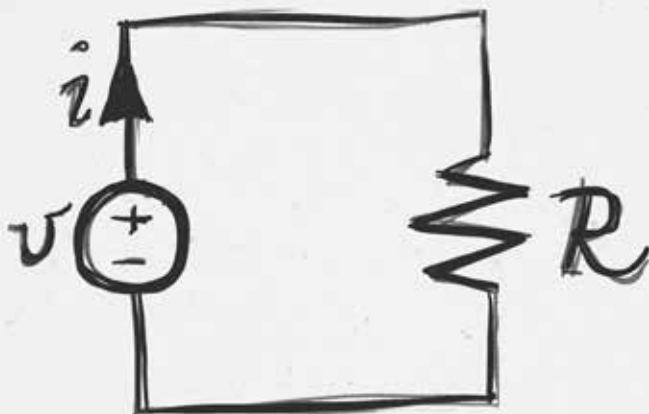


▲ Figur 1: Elektrisk laddning.

Figur 2 visar sambandet mellan ström och spänning, som det uttrycks i *Ohms lag*. Lagen säger att den elektriska strömmen (i) mellan två punkter är lika med elektriska spänningen (v) delat med resistansen (R) som mäts i [Ohm]. Resistans är ett motstånd mot den elektriska strömmen och kan beskrivas som en förlust i strömöverföringen.

Elkraftsystemet är en infrastruktur som flyttar elektrisk energi, i form av elektricitet, från energikälla till användare (läs mer i kapitlet om framtidens elkraftnät). För att göra detta på ett till-

ELEKTRISK STRÖM



- ▲ *Figur 2:* Elektrisk ström. Beteckningen i är för ström [mäts i A – Ampere], v är spänning [mäts i V – Volt], och R är resistans [Ohm] (där $i = V/R$, Ohms lag).

förlitligt, säkert och effektivt sätt har ett elsystem utvecklats med en blandning av likspänning/likström och växelspanning/växelström. Likström/likspänning innebär en konstant spänningsnivå medan växelspanning/växelström innebär att spänning och ström växlar riktning med en viss frekvens (se Figur 3). Frekvensen mäts i Hertz [Hz], där 1 Hz motsvarar en *period* per sekund – det vill säga en hel svängning på en sekund. I Europa används ett elkraftsystem med 50 Hz växelspanning (50 perioder per sekund)

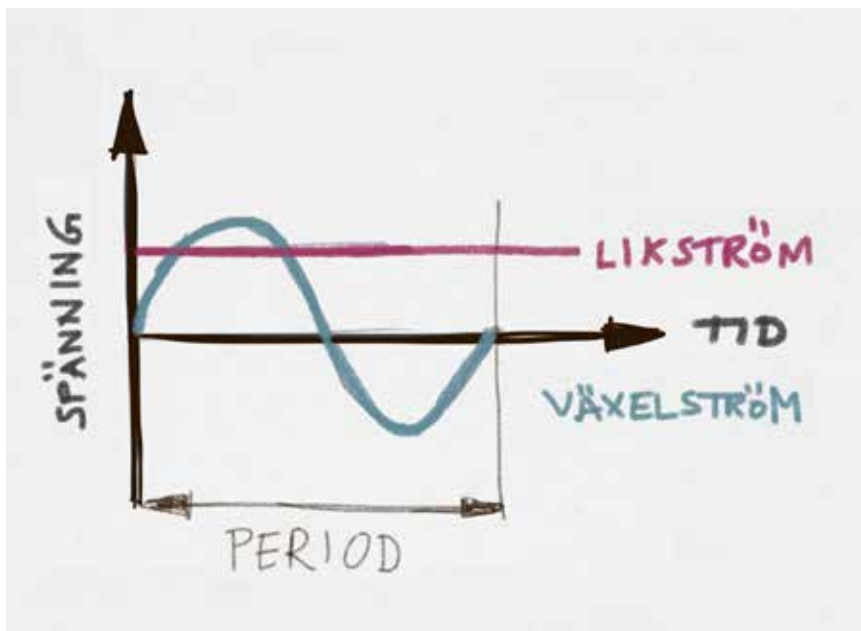
men exempelvis i Nordamerika används 60 Hz. För överföring av elektricitet mycket långa distanser, exempelvis mellan olika länder, används likspänning.

Sedan mer än hundra år tillbaka är elektriciteten en grundbult i det moderna samhället. Idag avstannar det mesta i våra städer och hem utan elektricitet. Genom historien har vi utvecklat olika sätt att framställa och lagra elektricitet för våra behov.

HUR PRODUCERAS ELEKTRICITET?

Elektricitet produceras från olika energikällor, som kan indelas i förnybara och icke-förnybara källor. Tillgången på *förnybara energikällor* varierar med årstid och väder. Exempel på förnybara energikällor är vatten-, vind-, solkraft och biomassa. Biomassa kan bestå av rester från skogen, växtolja eller från avfall från hushåll (läs mer i kapitlet om energi från biomassa respektive exkret). Icke-förnybara energikällor nybildas långsamt och förbrukas fortare än de nybildas. En speciell grupp av icke förnybara energikällor är fossila bränslen, som kol, olja och naturgas. När energi utvinns från dessa bildas växthusgaser, exempelvis koldioxid, som orsakar global uppvärmning. En annan icke-förnybar energikälla är uran, som används som bränsle i kärnkraftverk (läs mer i kapitlet om framtidens kärnkraft). I omställningen av energisystemet för ett uthålligt samhälle är målet att sluta producera elektricitet från fossila bränslen. I EU:s nya klassificering (2022) av energislag som ingår i omställningen för ett uthålligt samhälle ingår därför både el producerad från förnybara energikällor samt kärnkraft. Även naturgas ingår som en brygga innan förnyelsebara energilösningar hinner byggas ut exempelvis för Tyskland.

Elproduktionen brukar även delas in i *planerbar* och *icke-planerbar*, utifrån hur förutsägbar den producerade mängden el är. Elektricitet från förnybara energikällor som sol och vind, som kan variera mycket på kort sikt, brukar anges som oplanerbar, medan exempelvis kärnkraft är en planerbar källa med jämn och förutsägbar produktion av elektricitet.



▲ Figur 3: Likspänning/likström och växelspänning/växelström.

Elektricitet kan alltså produceras från olika energikällor. När elektriciteten väl är producerad är den likadan, oavsett hur den har framställts – det går alltså inte att särskilja elektricitet från olika energikällor. Detta kan liknas vid ett badkar som fylls från flera olika kranar. Det går inte att särskilja från vilken kran elektriciteten/vattnet kom när den väl ligger i karet. Det är därför omöjligt att använda elektricitet enbart från en viss kran (t.ex. fossilfri) om karet fortfarande fylls på med elektricitet från kranar med fossila bränslen. Det är heller inte möjligt att använda mer än vad som finns i karet – då riskerar systemet att kollapsa (läs mer i kapitlet om framtidens elkraftnät).

VAD ÄR SKILLNADEN MELLAN ELEKTRICITET OCH ELEKTRISK ENERGI OCH VAD ÄR STORLEKSORDNINGEN?

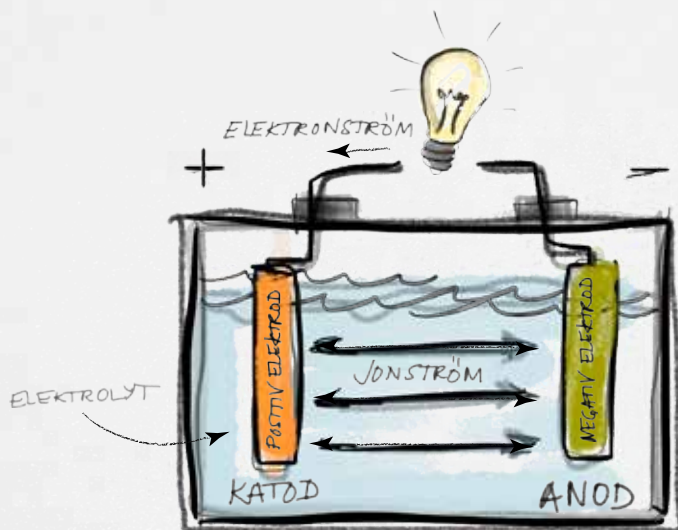
Elektricitet innebär ett flöde av elektroner, och finns i samma stund som den produceras. Kapaciteten hos en anläggning som producerar elektricitet brukar anges i *installerad effekt*, och anges i enheten Watt [W]. Denna anger hur mycket elektricitet anläggningen kan producera vid en viss tidpunkt. För en vindkraftsturbין kan den installerade effekten exempelvis ligga på omkring 3 MW (1 megawatt = 1 miljon Watt) jämfört med en kärnkraftsreaktor på 1 000 MW. Idag planeras stora havsbaserade vindkraftsturbiner för upp till 15–20 MW och för mindre kärnkraftreaktorers om mindre än 300 MW.

När vi talar om elektrisk *energi* menar vi mängden elektricitet som produceras eller används *under en viss tid*. Exempelvis kan den årliga produktionen av elektrisk energi från en vindkraftsturbין uppgå till 6 000 MWh, där *h* står för timmar – alltså 6 000 megawatt-timmar. Som jämförelse ligger den årliga elanvändningen i Sverige på cirka 140 TWh (1 terawatt-timme = 1 miljon MWh).

HUR KAN VI LAGRA ELEKTRICITET?

En utmaning med elektricitet är att den förbrukas i samma stund som den produceras. Därför behövs olika tekniker för lagring. Traditionellt har vattenkraft från dammar eller pumpkraftverk använts för att producera elektricitet (där vattnets läges- och rörelseenergi omvandlas till elektricitet). I en damm lagras vatten så att fallhöjden och vattenflödet kan användas för att producera elektricitet. I ett pumpkraftverk kan vatten pumpas upp och finnas tillgängligt att släppas ner när elektricitet behövs (samma princip kan användas i nedlagda gruvor; vatten pumpas upp och producerar elektricitet när det släpps ner i schakten). En annan teknik är att lagra energi som högttrycksluft. Överskott av elektricitet används då till att driva en motor som pumpar in luft i en tank eller grotta. Den lagrade luften kan sedan blandas med naturgas och användas till att producera elektricitet.

ELEKTROKEMISK CELL



▲ Figur 4: Elektrisk ström från kemiska reaktioner.

Idag är olika former av batterier en dominerande teknik för energilagring. Ett batteri består av en eller flera celler med lagrad energi som kan omvandlas till elektricitet för att driva komponenter som ansluts till batteriet. En vanlig teknik i batterier bygger på kemiska processer (se Figur och Faktaruta). Batterier har på senare år fått stort genomslag i transporter där de alltmer ersätter fossila bränslen. Litium-jon-batterierna står för den dominerande tekniken

i dessa elfordon (läs mer i kapitlet om material för elektrifiering av samhället). Trots att priset på batterier har gått ner markant är det fortfarande en dyr teknik för att användas för storskalig energilagring och har inte fått ett stort genomslag.

Bränsleceller är ytterligare en typ av energilagring. Här tillförs ett bränsle i form av vätska eller gas, därefter sker en kemisk reaktion och elektricitet matas ut. En teknik som idag är i fokus för bränsleceller är vätgas (se kapitlet om vätgas). Vätgas skulle exempelvis kunna produceras av elektricitet från vindkraft och därefter lagras. Vid behov kan den lagrade gasen sedan användas som bränsle i bränsleceller och producera elektricitet. Denna kombination av teknik skulle ge en möjlighet att slippa ”spilla” elektricitet som annars inte kunde användas. Det skulle också leda till att vindkraft kan användas *planerbart* vilket annars är en svaghet jämfört med exempelvis vattenkraft eller kärnkraft.

Vi kan också vilja lagra elektricitet för att ha tillgång till reservkraft, när den vanliga eltillförseln avbryts. I vissa verksamheter, som exempelvis sjukhus, skulle ett strömbavbrott annars få svåra konsekvenser. Traditionellt har dieselgeneratorer varit förstahandsvalet för reservkraft. Om vi i stället kunde använda batterier och bränsleceller som reservkraft skulle detta vara ett viktigt steg i omställningen mot ett fossilfritt samhälle.

BATTERIER BASERADE PÅ KEMISKA PROCESSER

I denna typ av batterier omvandlas kemisk energi till elektricitet. Den strömalstrande delen av batteriet består av tre delar – *anod* (minuspole), *katod* (pluspole) och *elektrolyt* (lösning som kan leda ström) – som tillsammans kallas för en *cell*. Anoden är idag ofta gjord av litium medan katoden vanligen är en metalloxid (förening av metall och syre), t.ex. mangan eller bly. Elektrolyten måste vara bra på att leda joner men dålig på att leda elektroner och kan t.ex. bestå av utspädd svavelsyra. Den kan även vara i form av gel eller polymer (plastmaterial) i flytande eller fast form. När batteriet ansluts till apparaten som det ska driva, t.ex. en mobiltelefon, börjar metallen i anoden avge elektroner. Eftersom elektronerna inte kan ta genvägen via elektrolyten till katoden rör sig en ström av elektroner från anoden, genom apparaten, till katoden. Inuti cellen transporteras samtidigt joner mellan den positiva och negativa elektroden via elektrolyten. I laddningsbara batterier är det möjligt att driva elektronerna åt andra hållet, genom att ansluta en yttre spänningskälla (batteriladdare).

I utformningen av batterier vill man uppnå en så låg vikt som möjligt, samtidigt som spänningen och kapaciteten (hur mycket ström batteriet kan avge över tid) ska vara höga. Begränsningarna avgörs av kostnader, enkelhet att tillverka, stabilitet i kemiska processen, och möjlighet att återanvända material. Det senare kriteriet blir allt viktigare med målet om en cirkulär ekonomi där material ska återbrukas i stället för att förbrukas.

ENERGINS HISTORIA

OXAR SOM
KRAFTKÄLLA



VED SOM
VÄRMEKÄLLA



PRODUKTION
AV TRÄKOL I
KOLMILA



TORVBRYTNING



STENKOL



OLJA OCH
NATURGAS



VATTENKRAFTVERK



KÄRNKRAFTVERK



BIOENERGIANLÄGGNING



ENERGI I HISTORISKT PERSPEKTIV

~~~~~  
*Per Högselius*

Människan har alltid använt sig av energi i olika former. Sett i ett historiskt perspektiv har vår globala energianvändning ökat – och periodvis minskat – över tid. Ett flertal energiomställningar har ägt rum, där nya energikällor har tillkommit och äldre, traditionella bränslen till viss del har fasats ut. Skillnaderna mellan olika regioner och länder har varit mycket stora, och även idag lever vi i skilda ”energivärldar”. I Sverige räcker det med att trycka på en knapp för att få tillgång till den energi vi behöver, medan en stor del av befolkningen – särskilt kvinnor – i många fattiga länder ägnar flera timmar av dagen åt att samla bränsle för att kunna laga mat till familjen. Ändå är vi alla sammanlänkade i ett mångfacetterat globalt system där vi är beroende av varandra.

Idag, på 2020-talet, domineras energiförsörjningen i världen av fossila bränslen. Kol, olja och naturgas står för runt 83 procent av världens energi. En genomsnittlig person konsumerar i runda tal ett ton kol, fyra fat olja och 500 kubikmeter naturgas per år. Resten av energin kommer från kärnkraft samt förnybara energislag som bioenergi, vattenkraft, vindkraft och solenergi.

I mänsklighetens gryning såg det annorlunda ut. Våra tidigaste förfäder var helt och hållet hänvisade till förnybara energislag för att producera ljus, kraft och värme. Kraftförsörjningen baserades på våra egna muskler. Vad som än skulle lyftas, flyttas, byggas, så gjorde vi det för hand. Så småningom lärde vi oss att tämja vilda djur och utnyttja även deras muskelstyrka. Hästar, åsnor, lamor och

kameler kom att fylla en viktig funktion för transporter. Oxar hörde till de viktigaste kraftkällorna inom det framväxande jordbruket. Ljus och värme framställdes vi genom att elda med ved, ris, oljor, djurspillning och andra organiska material.

I det förindustriella Europa dominerades "energimixen" helt och hållet av ved. Veden användes överallt i samhället. I hemmen eldade man för att värma upp kalla rum, värma vatten och laga mat. Enorma mängder slukades av de stora "eldnärningarna" som bagerier, bryggerier, tvätterier, glasblåserier och saltsjuderier. Under medeltiden, men särskilt från 1500-talet och framåt, växte även järnindustrin snabbt. Denna eldnäring utmärkte sig inte bara genom att den konsumerade långt mer energi än någon annan samhällelig verksamhet, utan också genom att smältugnarna eldades med träkol istället för ved. Träkol, som numera främst används som grillkol, är en raffinerad form av ved som traditionellt framställdes genom upphettning av trä med låg syretillförsel. Genom denna omvandling (torrdestillation) blev man av med föroreningar som svavel, som annars kunde försämra järnets kvalitet.

Veden hämtades i regel från närliggande skogar, och där låg även de kolmilor där ved omvandlades till träkol. Här, i skogen, tvingades européerna på ett tidigt stadium tänka "hållbart". Det gällde att inte hugga ned för mycket skog när man försökte tillgodose samhällets ved- och träkolsbehov; konsumtionen fick lov att anpassa sig efter hur snabbt skogen växte tillbaka. Det fanns därmed en tydlig gräns för hur mycket energianvändningen kunde öka utan att det förindustriella energisystemet skulle kollapsa.

Under 1700-talet växte energibehoven kraftigt. Det var en följd av ekonomisk tillväxt, en alltmer långväga handel, en kraftigt expanderande järnindustri och snabb befolkningstillväxt. I många länder oroades man sig för skogarnas framtid. Höga energipriser gjorde det frestande för många skogsägare att hugga ned mer skog än vad som egentligen var hållbart. Danmark och England hörde till de

länder som såg en stor del av sina skogar försvinna under denna tid. I städerna ondgjorde sig befolkningen samtidigt över kraftigt stigande bränslepriser. Bränslefrågan stod högt upp på dagordningen bland annat i franska revolutionen 1789, med dess radikala krav på politisk förändring. Vår tids "bensinuppror" och protester mot höga elpriser är ekon av dessa historiska skeenden.

Men de höga vedpriserna stimulerade också till uppfinningsrikedom. Geniala vedsparande innovationer lanserades, som exempelvis kakelugnen. Samtidigt intresserade sig många aktörer för alternativa energislag. Torv var sedan tidigare en viktig energikälla i länder som Holland och Irland och även i stora delar av Östeuropa. I Kina hade stenkol börjat användas i stor skala redan på 1000-talet, och i England hade stora mängder kol bränts sedan 1500-talet. Ur ett hälsoperspektiv uppfattades stenkolseldningen redan på den tiden som djupt problematisk. London fick tidigt rykte om sig som den stad i Europa där stadsluften var i särklass sämst. Det fanns också en religiöst rotad motvilja mot att gräva upp svart kol ur underjorden. Men i takt med att energibehoven ökade och vedpriserna sköt i höjden blev det ändå lockande att exploatera de "underjordiska skogarna", som stenkolsreviren ofta kallades. På allt fler håll försökte man sig under 1800-talet på en radikal omställning från ved till kol, såväl inom eldnäringarna som i många hushåll.

Omställningen gick olika snabbt i olika delar av Europa. Sverige, med sina rikliga skogar, hörde till de länder som in i det längsta höll fast vid ett ved- och träkolsbaserat energisystem. Stenkolet kom visserligen tidigt till användning för framställning av stadsgas (för belysning) och från 1850-talet också för järnvägstransporter och ångbåtstrafik. I städerna kunde man också höra dunket från en och annan ångmaskin. Men i hemmen fortsatte man att elda med ved, och den växande svenska järnindustrin fortsatte att förlita sig på skogen och träkolet för att smälta och reducera järnmalm. I början av 1900-talet eldades fortfarande en klar majoritet av alla svenska masugnar med träkol. Först under mellankrigstiden blev stenkolet en dominerande energikälla i Sverige. Förutom att järnindustrin

ställde om från träkol till koks (torrdestillerad stenkolk) eldade även hushållen allt oftare med kol och koks. Samtidigt byggde kommuner och industriföretag kolkraftverk för att tillgodose samhällets behov av elektricitet.

Kolet fick snart konkurrens av oljan. Begreppet ”olja” har historiskt syftat på olika typer av vegetabiliska och animaliska oljor, som olivolja och valolja. Detta förändrades under decennierna kring sekelskiftet 1900, när petroleum – ”bergolja” – började utvinnas i stora mängder. Detta fossila bränsle konkurrerade med tiden ut de äldre, förnybara oljorna. Petroleum användes till en början huvudsakligen för belysningsändamål, och den i särklass viktigaste raffinerade oljeprodukten var därför fotogen. I början av 1900-talet började bergoljan även användas för transporter, både till lands och till sjöss. Upptäckten av nya oljefyndigheter och en kraftigt ökad utvinning samspelade effektivt med nya uppfinningar som förbränningsmotorn. Bensin och diesel övertog då fotogenets roll som de viktigaste raffinerade oljeprodukterna. Motoriseringen som följde fick en oerhörd påverkan på samhället. I Sverige skedde det stora genombrottet under årtiondena efter andra världskriget.

Länge rådde ett stort överskott på olja globalt. Priserna pressades och oljan blev så billig att den även började användas för uppvärmning. Eldningsolja var ett betydligt renare bränsle än kol, och när oljan dessutom blev billigare ställde man på många håll om från koleldning till oljeeldning. Ett ännu renare bränsle var naturgas, som ofta utvanns tillsammans med olja. Förbränning av naturgas gav nästan inte upphov till några föroreningar alls (förutom koldioxid). Naturgasen blev därför oerhört populär och förblir så än idag. Omställningen från kol och olja till naturgas har i många storstäder bidragit till att få bort problem med smog.

En viktig skillnad mellan de tidigare energisystemen, där ved och träkol stod i centrum, och de fossila energisystemen, är att inte alla länder har haft tillgång till kol, olja och gas inom sina egna gränser. De allra flesta länder i världen har med åren blivit

kraftigt beroende av importerad fossil energi. Trenden har förstärkts över tid i takt med att allt fler länder bränt upp de sista inhemska resurserna. I Europa var exempelvis Holland länge en stormakt på naturgasområdet och en av världens största gasexportörer. Men på 2000-talet har landets inhemska resurser till stor del utarmats och holländarna har istället blivit stora importörer av det eftertraktade bränslet.

Sverige hör till de länder som har varit – och är – fullständigt beroende av import när det gäller fossila bränslen. Utan denna import skulle vi inte kunna köra våra bensin- och dieseldrivna bilar, lastbilstrafiken skulle stanna av, vi skulle inte kunna flyga, vi skulle inte ha någon stål- eller cementindustri och det svenska försvaret skulle vara helt paralyserat. Beroendet av importerad olja är särskilt stort – 2019 konsumerades i Sverige 325 000 fat (importerad) olja varje dag, motsvarande i runda tal ett fat (159 liter) i månaden per person.

Det svenska importberoendet gav upphov till viss oro redan kring sekelskiftet 1900. Då var det den svenska kolimporten som tedde sig osäker. Det berodde bland annat på upprepade strejker i de brittiska kolgruvedistrikten, från vilka Sverige då hämtade merparten av sitt kol. Utlandsberoendet ställdes sedan på sin spets under de båda världskrigen. Importen stryptes då och en ”omvänd” energiomställning ägde rum. Bland annat utrustades svenska vägfordon under andra världskriget med *gengasaggregat*, som använde ved som råvara. Även på andra områden gjorde veden comeback. Trycket på landets skogar ökade återigen, på ett sätt som påminde om 1700-talets spända situation.

Efter andra världskriget återgick Sverige till, och skalade ytterligare upp importen av, fossila bränslen. Världens energianvändning ökade nu snabbare än någonsin. Inom energihistorisk forskning kallas efterkrigstiden därför ofta för ”den stora accelerationen”.

Men oljeimporten blev åter osäker under 1956 års Suezkris, 1967 års sexdagarskrig i Mellanöstern och framförallt i samband med de

dramatiska prisökningar och oljeembargon som skapade 1973 och 1979 års oljekriser. En framtida huvudutmaning blev från och med nu att använda energi på ett mer effektivt sätt, och konsensus uppstod om behovet av en långsiktig utfasning av fossila bränslen. Man hoppades kunna ersätta dem med miljövänligare och geopolitiskt mer tillförlitliga – helst inhemska – energikällor.

1900-talet kännetecknades också av en snabb elektrifiering av samhället. I början var elektriciteten något av en lyxprodukt och ett udda, exotiskt inslag i det svenska energisystemet. Men med tiden kom elen att betraktas som närmast en mänsklig rättighet och dess användningsområden breddades. Precis som oljan användes elen till en början för belysning. Under 1900-talets första decennier började den sedan användas för matlagning och som kraftkälla. Under senare delen av 1900-talet kom elen, precis som oljan, dessutom att användas för uppvärmning av hus och vatten. Utvecklingen gick hand i hand med väldiga investeringar i ny elproduktion, där vattenkraftverk och kolkraftverk stod i centrum. De båda kraftverkstyperna samspelade för att garantera en riklig och tillförlitlig elförsörjning.

Av central betydelse var bygget av ett system för att distribuera elektriciteten i landet. Från 1937 kan man tala om ett nationellt sammanhängande elnät i Sverige. Tack vare detta nät kunde industrier i Stockholmsområdet och södra Sverige dra nytta av kraft som producerades i kraftverk tiotals eller rentav hundratals mil därifrån.

Under större delen av 1900-talet växte den svenska elkonsumtionen exponentiellt, med en fördubbling av konsumtionen ungefär vart tolfte år. Vattenfall och de andra aktörerna behövde med andra ord fördubbla kraftverksparken och elnätens överföringsförmåga inom varje kommande tolvårsperiod. Därför såg man sig hela tiden om efter nya möjligheter att få in mer produktion i systemet. På 1950-talet blev kärnkraften intressant som ett möjligt komplement till de existerande vatten- och kolkraftverken. Somliga aktörer trodde rentav att kärnkraften, som förväntades bli extremt billig,



helt skulle kunna ta över framtidens elförsörjning. Ett ambitiöst kärnkraftsprogram utarbetades med en plan för 24 stora kärnkraftsreaktorer. Men tekniska problem med säkerheten, en ökad komplexitet i kärnkraftsbyggena och fördyringar av investeringarna i kombination med ett växande folkligt motstånd mot kärnkraften tog ner kärnkraftsvisionärerna på jorden. Av de planerade 24 kraftverken förverkligades i slutänden tolv. 1980 folkomröstade Sverige om kärnkraftens framtid och ett riksdagsbeslut slog fast att en avveckling av kärnkraften skulle ske inom ett par decennier. Fem år senare, när de sista stora reaktorerna kopplats in på nätet, hade Sverige dock blivit ett av världens mest kärnkraftsberoende länder. Idag förblir kärnkraften en mycket viktig energikälla i vårt land – trots att hälften av reaktorerna hunnit läggas ned.

Under tiden utspelade sig något av en revolution på uppvärmningsområdet. Oljeeldningen fasades gradvis ut och ersattes till viss del av direktverkande el men framförallt av eldrivna värmepumpar samt biobränslen. Bioenergin blev tillsammans med eldning av avfall den nya kärnan inom fjärrvärmeförsörjningen. På detta sätt lyckades Sverige halvera sin oljeanvändning på bara ett årtionde.

Den totala energikonsumtionen i Sverige kulminerade i början av 1970-talet. Användningen av elektricitet fortsatte att växa ytterligare en tid, men planade ut från ungefär 1987 och har sedan dess legat på en plattå. Under en tid kunde man nästan få intrycket att energisystemet, och i synnerhet elsystemet, var ”färdigbyggt”. Men under senare år har denna bild rubbats. Idag pekar flera scenarier på ett enormt växande elbehov under kommande decennier till följd av de svenska ansträngningarna att fasa ut samtliga fossila bränslen och att ersätta en stor del av dem med elektricitet. Visionerna om framtidens energi är många och motstridiga, och vi kan vänta oss många konflikter och hård maktkamp i formandet av vår morgondag. Men en sak är säker: Sveriges energihistoria är på väg in i ett nytt, spännande kapitel.



# ETT HÅLLBART SAMHÄLLE HAR INTE RÅD ATT SLÖSA MED ENERGI

~~~~~  
Christophe Duwig

Det föregående kapitlet tog oss tillbaka i tiden och visade vilka positiva följder billig energi har haft på vår levnadsstandard. Idag tänker vi oftast inte på saken – vi bara kopplar in våra apparater och så finns elektriciteten där, redo att användas. Den här upplevelsen av överflödande, kanske till och med obegränsad, energi, kan leda oss till att tro att det inte gör så mycket om vi slösar med energin. Den är billig – vi har råd med det. Forskare som har kartlagt människans globala användning av energi har uppskattat att omkring 70 procent av den använda energin inte går till någon nytta. Den här oanvända energin är ofta i form av värme – ofta kallad spillvärme, eller värmeförluster – som släpps ut i atmosfären.

Denna osynliga, enorma energiförlust pågår ständigt, överallt omkring oss. Du känner det när du går förbi en diesel- eller biogasbuss en kall dag och värmen strömmar ut från motorns kylsystem. När du lägger handen på en laddande mobiltelefon. Eller kokar en kopp te. En studie som nyligen genomfördes i Storbritannien visade att människor, överlag, kokar ungefär dubbelt så mycket vatten som de använder för att brygga sitt te. Resten av det uppvärmda vattnet står bara kvar i vattenkokaren och svalnar, utan att göra någon nytta. Enbart denna spillvärme motsvarar ungefär 0,9 procent av den totala årliga elproduktionen i Storbritannien, vilket är tillräckligt för att förse omkring 60 000 hushåll med energi.

Värmeförlusternas osynlighet är en utmaning när vi vill försöka göra någonting åt problemet. För att hitta värmeläckor i byggnader



- ▲ *Figur 1:* Att koka upp för mycket tevattnen ger upphov till stora energiförluster. I Storbritannien skulle denna spillvärme räcka för att förse 60 000 hushåll med energi.

har yrkesmänniskor länge använt infraröda kameror. Dessa gör det lätt att upptäcka värme som försvinner genom fasaden eller via dåligt isolerade fönster. Nuförtiden kan vem som helst hyra sådana kameror för att undersöka när, var och hur värme går till spillo, och på så vis förbättra energieffektiviteten i sina hem.

En annan utmaning är att värmeförlusterna inte kommer från en stor källa, utan snarare ett stort antal små källor. Förlusterna av värme uppstår i allt vi gör: industri, transport, byggnader, affärsverksamhet, internetserverar, och så vidare. För att komma åt det här stora problemet behöver vi komma på en mängd små lösningar. Ibland handlar lösningarna om att förhindra värmen från att ta sig

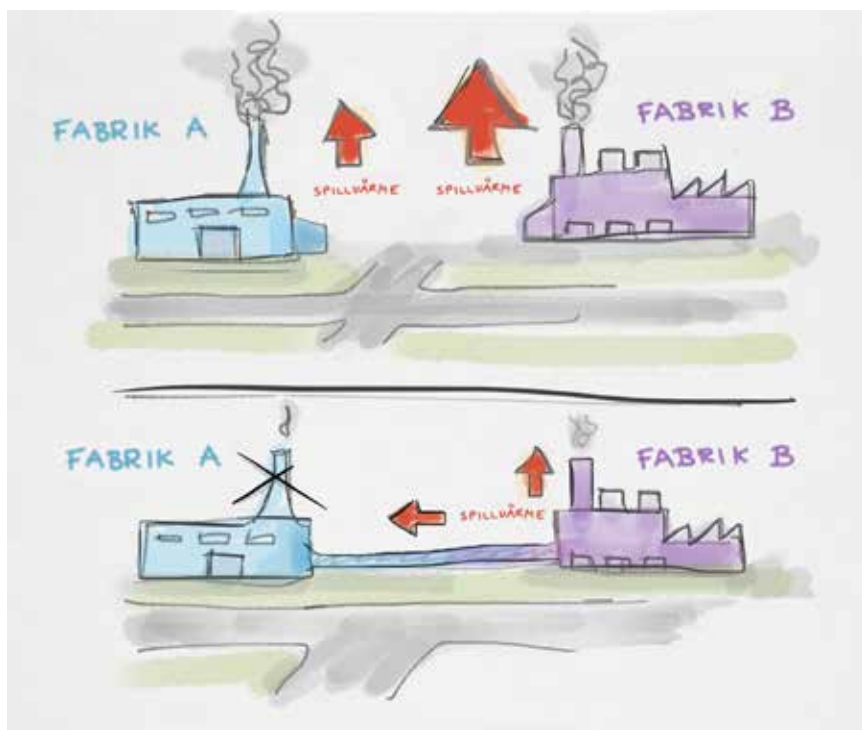
ut (t.ex. genom att isolera hus). Andra gånger kan det handla om att förebygga att värmen ens uppstår (t.ex. energieffektiva glödlampor). Just nu är det mycket forskning som fokuseras på hur värme kan fångas in, eller återvinnas, och användas igen.

Ingenjörer och forskare kategoriserar värmeförluster utifrån värmens temperatur. Överlag så ligger mer än 60 procent av den värme på temperaturer lägre än 100 °C. Tyvärr kräver dagens teknik temperaturer på över 300 °C för att värmen ska kunna samlas in och användas. Förlorad värme vid så höga temperaturer förekommer oftast i transportsektorn, som till exempel avgaser från förbränningsmotorer. Kupén i en icke-elektrisk bil kan därför värmas upp av värmen från bilens motor. Vid lägre temperaturer blir de tekniska lösningarna för att fånga in värmen mindre effektiva, mindre lönsamma (åtminstone så länge som det är billigare att slösa med energin) och mindre beforskade.

När vi nu byter ut de fossila bränslena i våra bilar mot elektricitet, tar vi även bort värmen från förbränningsmotorn. Det här minskar betydligt mängden förlorad värme med höga temperaturer. Men värme kommer fortfarande att skapas (och förloras) vid lägre temperaturer när elektriciteten till bilarna produceras, transporteras och omvandlas (t.ex. som uppvärmning av batterier när de laddas eller laddas ur under användning).

Den industriella processen för att tillverka stål med hjälp av vätgas är ett annat exempel på hur komplex frågan kring förlorad värme kan vara. Det här är en spännande teknik som skulle kunna göra ståltillverkningen fri från utsläpp av växthusgaser. I dagsläget, när vätgasen produceras genom elektrolys (se kapitlet om vätgas), går omkring 40 procent av elektriciteten till spillo som förlorad värme med låg temperatur. Förhoppningsvis kommer forskningen att kunna lösa den här frågan, men det är en påminnelse om att vi måste välja teknik för framtiden som verkligen är hållbar och inte bara leder till att vi upprepar tidigare misstag.

Att fånga in istället för att förlora värme kan påskynda omvandlingen av vårt energisystem. Det är en aktuell utmaning, som



▲ *Figur 2: Mindre utsläpp och bättre ekonomi när fabrikerna samordnar sin produktion och förbrukning av värme.*

tyvärr inte återspeglas i den politiska debatten. Som forskare i det här fältet skulle jag vilja nämna ett par nyckelfrågor som behöver tas upp på den politiska agendan om vi ska kunna skapa ett hållbart energisystem.

För det första behöver vi göra så att det går snabbare att skapa ny kunskap och innovationer. Detta innebär att vi måste vända ryggen till den traditionella trial-and-error-metod som hittills har präglat industrins utveckling. Istället bör vi utveckla och testa flera idéer parallellt. För att påskynda de tidiga utvecklingsfaserna

bortom vad som är möjligt i den fysiska världen, kan vi använda virtuella världar skapade av (super)datorer. De virtuella världarna låter oss utforska och testa våra idéer, och välja ut lovande alternativ för vidare studier, mycket snabbare än vad som någonsin skulle vara möjligt i den fysiska världen. Till exempel studerar forskare och ingenjörer nu hur värme överförs i komplexa nya material, och undersöker allt mindre detaljer för att förstå de detaljerade mekanismerna i processen. Detta är möjligt tack vare framsteg som nyligen gjorts inom superdatorer och förutsäggande (eng. *predictive*) simulationer – i den virtuella världen blir osynliga värmeflöden synliga.

För det andra – och detta är möjligen ännu viktigare – behöver vi göra utmaningen i sig synlig och förståelig för alla. Med mer kunskap kan vi ställa bättre krav på våra förtroendevalda och beslutsfattare, och dessutom veta vad vi själva kan göra i vardagen. Vägen framåt kommer att vara en kombination av tekniska lösningar och att vi själva ändrar vårt beteende. Här spelar vår användning – och värdering – av energi en viktig roll. Utmaningen, liksom lösningen, är global och behöver inkludera alla intressenter. Genom att vara informerade och kritiska medborgare kan vi kräva nya lagar, regler och incitament för att industrin och samhället i stort ska inse att vi inte kan uppnå våra mål om vi fortsätter slösa med energi.

Som avslutning på kapitlet skulle jag vilja uppmuntra alla er läsare att undersöka var värme försvinner och går förlorad i era egna hem. Kanske kan det bli ett första steg mot att förändra hur vi värderar energi, och – i det långa loppet – mot ett hållbart energisystem. Kanske kommer du även att tänka på hur mycket vatten du håller i vattenkokaren, nästa gång du ska göra en kopp te.

NYA VANOR FÖR INDUSTRIER

I stora delar av världen har olika industrier utvecklats vid olika tidpunkter, ofta med fokus på en enskild plats och verksamhet. Den här utvecklingen i ”stuprör” har endast nyligen börjat ifrågasättas. Det

är lätt att hitta exempel där Fabrik A bygger sin egen värmepanna för att kunna skapa vattenånga, medan Fabrik B, några hundra meter bort, har ett överflöd av värme i sin verksamhet. Eftersom det inte har funnits några incitament (utöver priset på bränsle/energi) för fabrikerna att integrera sina energiflöden, kommer både Fabrik A och B att producera spillvärme istället för att samarbeta (övre delen av bilden). En tydlig väg framåt skulle vara att uppdatera resultatindikatorer (mått som används av företag för att utvärdera sin prestation) till att ta med den här typen av integration mellan närliggande verksamheter i beräkningarna.

Att motivera mänskligheten till att sluta slösa energi – trots att vi ”har råd” med det – är en viktig samhällsutmaning. Annars kommer dagens slöseri att stå oss dyrt i framtiden.

VISSTE DU ATT?

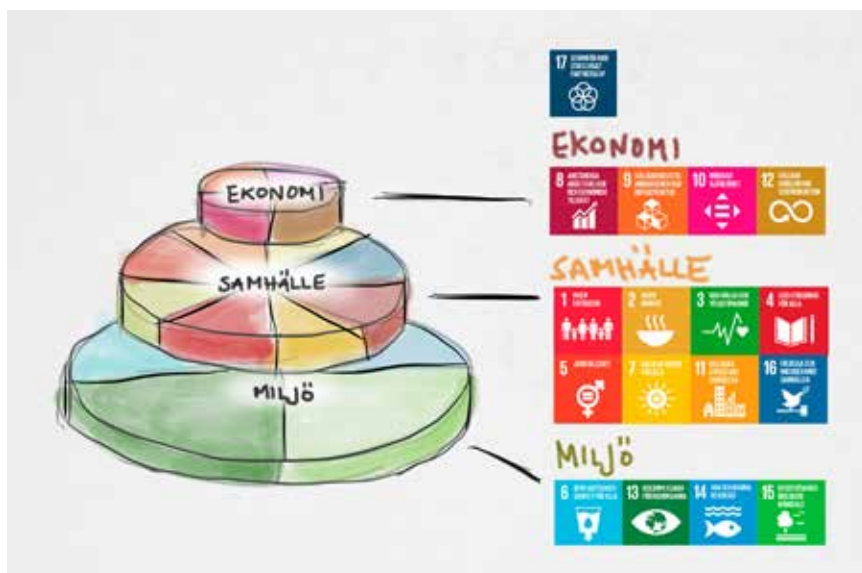
Effekt mäts i enheten Watt (efter den skotske uppfinnaren James Watt, 1736–1819). För att uttrycka energiförbrukning använder vi kWh (kilowatt-timmar), vilket är mängden energi som används av en viss apparat under en timme. Till exempel, 1 kWh motsvarar mängden energi som skulle krävas för att lyfta en medelstor bil (1,8 ton) till toppen av Turning Torso i Malmö (190 meter). År 2021 kostade 1 kWh i medeltal en svensk krona.

GLOBALA MÅLEN SOM STÖD FÖR UTFORMNING AV ENERGIPROJEKT OCH BESLUTFATTANDE

~~~~~  
*Francesco Fusco Nerini*

Med bara åtta år kvar till 2030 ser vi att framstegen mot FN:s Globala mål för hållbar utveckling går långsamt, och i vissa fall rent av baklänges. Vi behöver en mycket mer ambitiös omvandling om vi ska lyckas uppnå ens några av målen på global nivå. Ett av hindren mot att uppnå målen är en bristande förståelse för kopplingarna mellan olika aspekter av hållbar utveckling. För att ta oss förbi denna barriär har ett nytt forskningsområde skapats för att utvärdera de olika målens förhållande till varandra och föreslå metoder för att uppnå samtliga mål som en helhet. Sådana utvärderingar kan till exempel handla om hur ett visst område eller frågeställning (eller ett enskilt mål) påverkar uppfyllelsen av alla mål, och hur vi kan utforma strategier för att undvika målkonflikter och göra det mesta av synergier.

Det har lagts ner stora arbetsinsatser på att undersöka hur Globala målen skulle kunna användas för vägledning i utformningen av projekt och beslutsfattande kring energi. Energiprojekt kan påverka hållbarhetsmålen på många olika vis. Till exempel kan projekt om hållbar energi ha effekter på uppfyllelsen av samtliga mål – från *Hållbar energi för alla* och *Bekämpa klimatförändringarna* (Mål 7 respektive 13) till *Ingen fattigdom* och *Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt* (Mål 1 respektive 8). Närmare tre miljarder människor i världen lagar mat med hjälp av energi från insamlad ved. Modern energi för matlagning har alltså tydliga följder för



- ▲ *Figur 1:* Illustration av Globala målen för hållbar utveckling. I sin rapport 1987 definierade Brundtlandkommissionen hållbar utveckling som "en utveckling som tillgodoser dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillgodose sina behov".

jämställdhet (Mål 5) och hälsa (Mål 3). I bredare bemärkelse kan målet om tillgång till energi påverka alla andra mål, från samhällets och människors välmående till miljö och naturtillgångar.

Det finns sammanlagt 17 hållbarhetsmål och varje mål är uppdelat i ett antal delmål. Exempelvis är ett av delmålen för Mål 7 – *Hållbar energi för alla* – att till år 2030 "öka andelen förnybar energi i världen". För fem år sedan, 2017, gjorde jag och mina kollegor ett första försök att förstå kopplingarna mellan energi och Globala målen på en global nivå. I vår forskning utvärderade vi hur vart och ett av de 169 delmålen relaterade till energisystem. Vi gjorde detta genom att besvara två frågor för varje delmål: (A) Uppmanar delmålet till åtgärder kopplade till energisystem? och (B) Finns det

publicerade vetenskapliga bevis för synergier eller konflikter mellan delmålet och Mål 7 (Hållbar energi för alla)?

Med avseende på den första frågan fann vi att omkring två tredjedelar (113 av 169) av alla delmål kräver åtgärder med koppling till energisystem. Dessa åtgärder är sinsemellan olika och inkluderar exempelvis att tackla klimatförändringar, minska dödsfall till följd av föroreningar, och att sätta stopp för vissa brott mot mänskliga rättigheter. Resultatet visar hur omfattande förändringarna i globala energisystem måste vara för att vi ska kunna uppfylla Globala målen. Vi identifierade också synergier eller konflikter mellan nästan nio av tio (143 av 169) delmål, fördelade på samtliga mål. Sett från den positiva sidan hittade vi mer än dubbelt så många synergier som konflikter mellan Mål 7 (*Hållbar energi för alla*) och andra delmål. I stort sett samtliga konflikter är relaterade till å ena sidan behovet av snabba åtgärder i frågor som är avgörande för människors hälsa (t.ex. *Ingen fattigdom*, *Rent vatten och sanitet för alla*, *Ingen hunger*, och *Hållbar energi för alla*) och å andra sidan den noggranna planering som krävs för att skapa effektiva energisystem baserade på förnybar energi.

Ett flertal forskare, bland annat från mitt forskarlag, har nyligen gjort ett försök att använda den här kunskapen om globala kopplingar mellan hållbarhetsmålen för att styra projekt och beslutsfattande som har med energi att göra. Ett sådant exempel är *Ramverket för utvärdering av energiprojekts påverkan på Globala målen* (eng. *Sustainable Development Goals Impact Assessment Framework for Energy Projects*; förkortas *SDGs-LAE*). Ramverket gör det möjligt att i förväg identifiera och utvärdera synergier och konflikter bland samtliga delmål som påverkas av ett visst energiprojekt. Forskarna testade ramverket på två olika fallstudier: Stora etiopiska renässansdammen (the Grand Ethiopian Renaissance Dam; GERD) på floden Blå Nilen i Etiopien, och kärnkraftverket Hinkley Point C (HPC) i Somerset i Storbritannien. Forskarna utvidgade sedan ramverket för att även ta med åtgärder som intressenter kunde vidta för att maximera projektets synergier med Globala målen och samtidigt minimera målkonflikterna.



- ▲ *Figur 2: Synergier och målkonflikter när ramverket SDGs-IAE tillämpas på GERD-projektet. Delmålen syns till höger om varje hållbarhetsmål. Synergier är gröna medan målkonflikter är röda. När delmålen är vitfärgade innebär det att forskarna inte kunde hitta några publicerade bevis för synergier eller målkonflikter, vilket inte behöver betyda att sådana inte förekommer i verkliga livet.*

När forskarna analyserade GERD-projektet med hjälp av ramverket fann de 77 möjliga synergier och 43 målkonflikter (se Figur 1). De flesta *synergierna* har att göra med den ökade tillgången till elektricitet för befolkningen både i städer och på landsbygden i Etiopien och den närliggande regionen. Detta bör bli en skjuts för delmål kring fattigdom, hunger, utbildning och jämställdhet. Vattenkraft är därtill en förnybar, kolneutral, energikälla vilket i sig leder till många synergier, som exempelvis för delmål om att minska dödsfall till följd av luftföroreningar, minskning av avfall och att

länder integrerar åtgärder mot klimatförändringar i sin planering. Sammantaget visar dessa synergier många möjliga gynnsamma sociala och ekonomiska följder av GERD-projektet i Etiopien.

Viktiga *målkonflikter* i GERD-projektet handlar i första hand om den oberäknliga effekt som projektet kommer att ha på vattentillgången i länder som ligger längre ner i Blå Nilens flöde. Andra faktorer som behöver vägas in att lokala samhällen inte har något inflytande på beslutsprocessen och att de tvingas flytta. Att samhällen förflyttas och sedan måste återetableras är ett av de mest akuta problemen som stora dammprojekt för med sig, med avseende på social rättvisa. Sett till Globala målen så innebär det målkonflikter med bland annat delmål om att skydda kulturarv, och ansvarsfull och säker migration. För att säkerställa GERD-projektets sammanlagda hållbarhet behöver alla dessa målkonflikter analyseras och tas i beaktande för att undvika konflikter och skadeverkningar när projektet nu fortskrider.

Den här tillämpningen av ramverket på Etiopiska renässansdammen är ett exempel på hur Globala målen kan användas för att vägleda energirelaterade beslut.

Utanför universiteten har ett antal nationella och internationella organisationer börjat använda Globala målen som stöd för sina beslut. Ett exempel är UNOPS – FN:s kontor för projektjänster – som har skapat ett online-verktyg för utvärdering av hållbarhet i infrastrukturprojekt.

Sammanfattningsvis har forskningen nyligen visat hur Globala målen kan användas som stöd för energirelaterade beslut. Med tanke på det stora antalet beröringspunkter mellan energi och Globala målen måste vi utveckla verktyg som ger människor kunskap om hur specifika energiprojekt kan påverka både lokal och global uppfyllelse av målen. Sådan förbättrad kunskap och kommunikation kommer inte bara att leda till mer positiva projektresultat – det kan även stärka den demokratiska processen. När människor får mer kunskap om synergier och målkonflikter som deras val medför, blir det lättare – och mer motiverande – att skapa förändring.



# OLJA OCH GAS – ETT PROBLEMATISKT BEROENDE

~~~~~  
Christophe Duwig

I den mänskliga historien kan vi se hur teknisk utveckling i samhället leder till nya livsstilar och ökad efterfrågan på energi. För att möta denna efterfrågan behöver vi primära energikällor. Primära energikällor inkluderar fossila bränslen, kärnkraft och förnybara energikällor som vind och sol. Olja och gas är särskilt viktiga bland dessa källor. År 2019 stod fossila bränslen för 84 procent av världens använda primärenergi, där naturgas och olja stod för särskilt stora andelar. Även i EU utgör olja och gas två tredjedelar av primärenergien, dock med en liten minskning sedan 2008. Olja används därtill inte enbart som bränsle – den är en vanlig ingrediens vid tillverkningen av plast och färg, vilket ytterligare ökar dess betydelse i samhället. Testa att se dig omkring och notera antalet människotillverkade saker som inte har tillverkats med hjälp av olja. Allt som innehåller plaster, färger och metaller går med andra ord bort. *Varför metaller?* kanske du undrar. Eftersom olja är den främsta energikällan för gruvdrift och transporter så skulle *ingen olja* betyda *inga metaller*. Europeiska Unionen, och Sverige i synnerhet, är beroende av mängder av metaller och varor vars tillgång i sin tur är beroende av olja. Oftast noterar vi bara denna koppling när stigande oljepriser leder till högre priser på en mängd andra varor, från tillverkade produkter till livsmedel.

Vi skulle kunna betrakta oljans dominerande roll i samhället som ett slags beroende. Ett beroende är svårt att bryta, trots att de drabbade vill att det ska ta slut. Att sätta punkt för beroendet kräver

hårt arbete och ihärdiga insatser under lång tid. Under coronapandemin utformade EU ett historiskt stort stödpaket i syfte att skydda ekonomin, undvika arbetslöshet och skynda på övergången till förnybar energi. Samtidigt gick en avsevärd del av paketet och efterföljande investeringar till att stödja fossila bränslen. Det kanske kan låta märkligt, men egentligen fanns det ingen annan utväg. Att stödja ekonomin utan att samtidigt ge stöd till fossila bränslen är helt enkelt inte möjligt i dagens värld.

År 2020 betalade världens länder sammanlagt omkring femtusen miljarder kronor (motsvarande Sveriges BNP) i subventioner för fossila bränslen. Subventionerna används för att på konstgjort vis sänka bränslepriset för konsumenter och företag. Det förlänger förstås vårt beroende och försenar omställningen till fossilfri energi, och stödjer indirekt slöseriet med (billig) energi. Ett aktuellt exempel är när olje- och gaspriserna steg till följd av kriget i Ukraina. Många europeiska regeringar (inklusive Sveriges) agerade genom att öka oljesubventionerna för att på så vis dämpa prisökningen för konsumenter. Agerandet går emot generella principer och åtaganden som länderna gjort gentemot Parisavtalet och visar hur beroende vi är av billig olja.

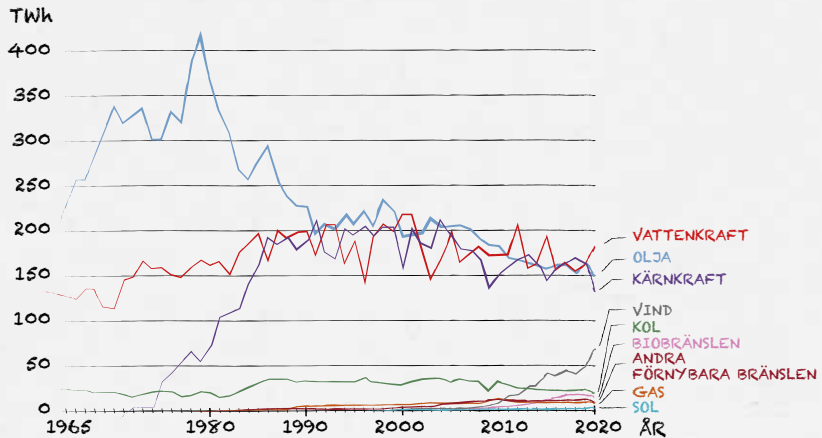
Världsenergirådet (eng. *World Energy Council*) har infört tre indikatorer som kan användas för att följa energisituationen i världen. Tillsammans utgör indikatorerna ett "trilemma" – ett dilemma, men med tre aspekter. I trilemmat är det enkelt att uppfylla en av aspekterna, men nästintill omöjligt att uppfylla samtliga tre. Den första indikatorn är *energisäkerhet* – att energin finns tillgänglig på ett kontinuerligt och tillförlitligt vis. Överlag får europeiska och andra rika länder väldigt höga poäng på denna indikator. Den andra indikatorn är hur *hållbar* energin är ur ett miljöperspektiv. Här får länder med stor andel vatten-, vind- eller kärnkraft höga poäng, vilka bland andra inkluderar Sverige, Schweiz och Frankrike. Den tredje indikatorn är *rättvisa*, och handlar om hur överkomligt priset på energi är för landets invånare. Länderna som får högst poäng på denna indikator betalar ut stora subventioner som gör energin

(ofta olja) nästintill gratis att använda. Exempel på sådana länder är Qatar och Kuwait.

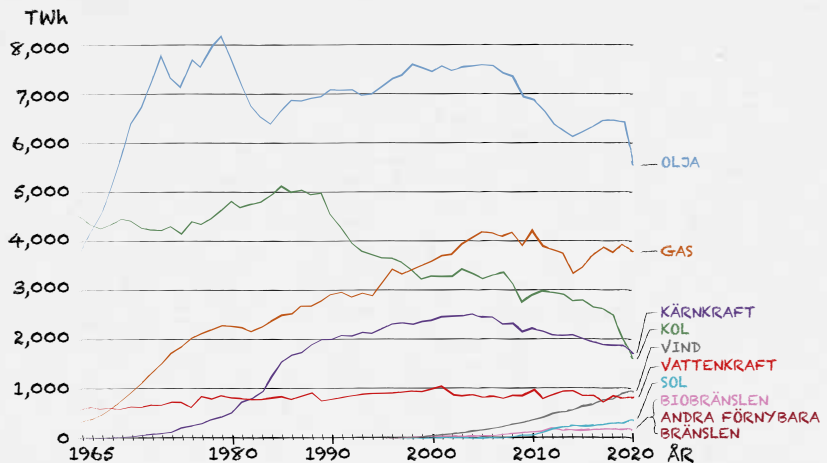
För att ta ett exempel kring detta trilemma, låt oss säga att det Ukrainska kriget är slut och att länder då beslutar sig för att kraftigt höja skatterna på olja (negativa subventioner). Åtgärden kommer att vara till omedelbar nytta för klimatet och miljön, men kommer också leda till ökade energipriser och därmed försämra rättvisaspekten. Den skulle också kunna leda till brist på metaller och livsmedel. Priserna på utrustning som behövs för att utvinna hållbar energi kommer också att öka på samma vis. Många människor kommer inte att klara av dessa följder utan drabbas av fattigdom. På det hela kommer effekterna att bromsa (och antagligen stoppa) samhällets övergång till ren energi. Det här exemplet visar hur komplext energisystemet är och hur alla större förändringar måste planeras noggrant utifrån en tydlig långsiktig strategi. Annars riskerar de att leda till följder som är raka motsatsen till deras syfte.

Trots att olja och gas kan tyckas tillgängliga och alltid nära till hands, så är deras tillgångar begränsade. Egentligen är oljan tillgänglig och billig enbart eftersom det finns olja som kan driva transporten av olja ... tills det inte längre finns någon olja. Uttrycket *peak oil* (på svenska *oljeproduktionstoppen*) började användas på 1970-talet och hänvisar till en tidpunkt när världen har nått sin maximala kapacitet för oljeproduktion. Under årens lopp har olika prognoser gjorts för när *peak oil* kommer att inträffa. Att göra den här typen av prognoser är väldigt komplicerat, eftersom de bygger på många faktorer som sinsemellan är kopplade till varandra. Här ingår till exempel hur stora (de kända) oljereserverna är, var de finns och hur lätta de är att komma åt, geopolitiska frågor, minskande efterfrågan, befintliga teknologier, konkurrerande teknologier, investeringar (det kan ta upp till ett årtionde att öppna ett nytt oljefält eller renovera utrustningen på ett befintligt fält), med flera. Därför har uppskattningarna om när *peak oil* kommer att inträffa varierat stort. Idag tycks många vara överens om att toppen för konventionell olja nåddes omkring 2010, medan datumet för övriga

KONSUMTION AV PRIMÄRA ENERGIKÄLLOR, SVERIGE



KONSUMTION AV PRIMÄRA ENERGIKÄLLOR, EU



sorters olja beräknas till någon gång mellan år 2020–2030. När datumen har passerats kommer utvinningen av olja att sjunka.

När man talar om *peak oil* har man traditionellt avsett toppen både för efterfrågan och tillgång på olja. Efterfrågetoppen (eng. *peak demand*) inträffar när kunder inte längre kan *köpa* mer olja – antingen för att de inte har råd, eller för att de väljer andra alternativ. Subventioner kan hjälpa till att fördröja efterfrågetoppen genom att hålla en hög efterfrågan, samtidigt som de gynnar en rättvis tillgång till energi.

Tillgångstoppen (eng. *peak supply*) hänger samman med storleken på oljereserverna och människans kapacitet att utvinna dessa. De nyare oljereserver som har upptäckts har inte varit tillräckligt stora för att täcka våra årliga behov. Utvinning av olja kräver investeringar och även dessa har legat på en historiskt låg nivå. Sammantaget tyder detta på att produktionen av olja kommer att minska under det kommande årtiondet.

Nyligen pekade en vetenskaplig studie på ytterligare en faktor som hittills inte tagits in i ekvationen: oljans minskade utdelning energi per investerad krona. Energin som krävs för att utvinna energi från olja åter med andra ord upp allt mer av mellanskillnaden, alltså ett slags ”energi-kannibalism”. I dagsläget är energikostnaden 15,5 procent, vilket innebär att om vi utvinner olja motsvarande 1 kWh energi, har vi använt 0,155 kWh för att driva utvinningsprocessen. Då återstår 0,845 kWh kvar att sälja. Det här är mycket dyrare än under 1950-talet och kostnaden fortsätter att öka.

Anledningen är att oljan i de lättåtkomliga reserverna håller på att tömmas, vilket gör det nödvändigt att utvinna olja från mer

- ◀ *Figur 1:* Konsumtion av primära energikällor i Sverige respektive EU. År 2019 bestod världens primärenergi av: kärnkraft (4,3 %), förnybara källor (11,4 %, exklusive biobränslen), fossila bränslen (83,3 %). I Europa var motsvarande siffror: kärnkraft (9,9 %), förnybara källor (16,5 %, exklusive biobränslen), fossila bränslen (73,6 %). Källa: BP Statistical Review of World Energy 2019.

svåråtkomliga fälten. Enligt studiens prognos kommer energikannibalismen att ha nått 50 procent år 2050. Detta inverkar negativt på samtliga indikatorer i trilemmat: Energisäkerheten sjunker, eftersom olja inte alltid finns tillgängligt; den miljömässiga hållbarheten försämras eftersom det krävs mer olja för att utvinna mindre olja; och orättvisorna kommer att öka till följd av höjda priser. Dagens politiska verktyg för att dämpa oljeprisernas effekter på samhället kommer inte heller att fungera, eftersom deras syfte är att reglera *efterfrågan*, medan kannibalismen påverkar *tillgången* på olja.

Paradoxt är vår nuvarande jakt på förnybar energi i allra högsta grad beroende av olja. Oljan behövs för att vi ska kunna utvinna de förnybara råmaterialen, omvandla dem till användbara former och tillverka den nödvändiga utrustningen. Därför innebär peak oil sannolikt toppen för den billigare tillgången till alla former av energi – och allt som energin *används till* (mat, varor, transporter, m.m. – ”*peak all*”). Det är viktigt att vi har detta i åtanke när vi utformar beslut och strategier för nollutsläpp av koldioxid. Idag behöver vårt samhälle olja för att fungera, och för att kunna bli hållbart på riktigt i framtiden. Det kommande årtiondet kommer både att handla om att lösa klimatutmaningen och bryta vårt beroende av olja. För att undvika att bli fångade mellan dessa motstridiga mål måste vi diskutera prioriteringar och göra en tidsplan för när vi ska göra vad.

Under 1980-talet lyckades Sverige halvera sin användning av olja på bara ett decennium. Regeringen hade då utvecklat en långsiktig plan för att minska oljeimporterna efter oljekrisen 1973. Planen ledde till att vi byggde kärnkraftverk, började värma upp hus och byggnader med el, och använde biomassa och avfall för fjärrvärme. Effekterna började synas ungefär fem år senare och resulterade i en dramatisk minskning i användningen av fossila bränslen. Men omställningen till noll koldioxidutsläpp är långtifrån färdig. I EU överlag ligger konsumtionen av olja fortfarande på samma nivåer som på 1970-talet, medan användningen av naturgas har ökat stadigt. För att göra övergången möjlig måste vi ta oss an vårt beroende av olja med både beslutsamhet och kunskap.

BIOMASSA – EN MÅNGSIDIG NATURRESURS

~~~~~  
*Henrik Kusar*

Biomassa står för cirka 10 procent av all energi som används i världen och utgör den absolut största andelen av de förnybara bränslena (biobränslen). Detta gäller särskilt för matlagning och uppvärmning i många utvecklingsländer. Idag ökar användningen av biobränslen för transporter och elproduktion i många länder som ett sätt att minska koldioxidutsläppen från fossila bränslen.

Men vad är då biomassa? Ur ett biologiskt perspektiv är biomassa alla former av liv som finns på jorden. Biomassa är träd, buskar, gräs och alla andra sorters växter, allt djurliv, även människor, bakterier och svampar. Biomassa finns även i haven, som alger, plankton, fiskar, valar, skaldjur och alla andra organismer, men den absolut största andelen finns på land. Trots att haven står för två tredjedelar av jordens yta innehåller de bara en procent av den sammanlagda biomassan.

Men, det är inte alla organismer i naturen som kan *bilda* biomassa från grunden, det är främst växterna som klarar det genom fotosyntesen. Växterna utgör därmed basen för all annan biomassa på jorden.

Växternas fotosyntes är nyckeln till att ny biomassa kan bildas av vatten och koldioxid. Detta skulle under andra omständigheter kräva stora mängder energi, men i fotosyntesen hämtas denna energi ”gratis” från solens strålning. I fotosyntesen tar växterna tillvara solenergi för att bilda socker och syre. Sockret, som består av kol- och vätemolekyler, kan sedan omvandlas till alla stora molekyler som en växt behöver.



▲ *Figur 1:* Växterna utgör grunden för all annan biomassa på jorden.

När vi talar om biomassa utifrån energi eller annan mänsklig användning avser vi både att den kommer från levande organismer och är *förnybar*. Fossila bränslen som kol och olja har också sitt ursprung i biomassa, men bildades för miljontals år sedan och räknas därför inte som förnybara. Biomassa är därmed ett slags lagrad solenergi och en förnybar energikälla som ingår i naturens kretslopp. Det betyder att den energi som vi utvinner ur biomassa



inte släpper ut mer koldioxid än vad växterna hade bundit under sin livstid.

På vår jord bildas över 100 miljarder ton ny biomassa per år. Det skulle räcka till mer än 10 ton biomassa per människa, vilket förstås är omöjligt eftersom vi måste samsas om den med djur och natur. En förutsättning för att det ska kunna bildas så mycket biomassa varje år är att skogarna får stå kvar, annars minskar mängden biomassa som kan bildas.

Det är i skogarna som de största mängderna biomassa finns. Hälften av världens skogsyta finns i de fem största länderna: Ryssland och Kanada har mycket barrträd, i Brasilien finns regnskog, och i USA och Kina mer blandad lövskog. Skogar finns i både varma och kalla länder, men växer betydligt snabbare i varma

länder – om det regnar tillräckligt mycket. Skogarna är förstås inte enbart viktiga för att vi ska kunna bilda ny biomassa. De är också avgörande för den biologiska mångfalden, ger oss syre och ren luft och behåller dricksvatten, och gör att mängder av ekosystem som vi är beroende av fungerar.

Människor har i alla tider använt biomassa både för att framställa material och energi. Att använda biomassa som material är fortfarande väldigt vanligt – tänk allt i våra hem som är tillverkat av trä. Nu för tiden har plaster och kompositmaterial dock tagit över; dessa är enklare att forma, väger mindre och kan ges en massa speciella egenskaper. Idag tillverkas dessa plaster och kompositmaterial i stort sett alltid från fossilt ursprung, men man skulle kunna tillverka många av dessa material även från biomassa.

Den absolut vanligaste användningen av biomassa i världen är för att utvinna energi. Vi eldar till exempel biomassa för att få värme till våra hus och till matlagning. Att elda biomassa i enkla spisar har gjorts i alla tider, men idag finns betydligt mer energieffektiva och bättre sätt att förbränna biomassan utan att förgifta omgivningen med en massa farlig rök. I moderna eldstäder och spisar blir man av med i stort sett alla farliga utsläpp, förutom koldioxid. Biomassa i form av matavfall och rötavfall från avloppsslam passar bra för att göra biogas och är också relativt enkelt och faktiskt ofta lönsamt (läs mer i kapitlet om energi från avföring).

Tyvärr räcker inte biomassan till för att ersätta allt fossilt bränsle som används idag. Därför måste vi utnyttja den väl. Både i EU och i resten av världen finns många uttalade önskemål om att öka andelen förnyelsebar energi i världen. Som redan nämnts så kommer den största andelen av förnyelsebar energi redan idag från biomassa.

Ur ett globalt perspektiv slösas det tyvärr med värdefull biomassa när den eldas upp för att producera värme, särskilt när detta görs i stora anläggningar med dålig verkningsgrad. Om värmeproduktionen kombineras med produktion av elektricitet (t.ex. med bränsleceller, gas- eller ångturbiner) i värmekraftverk kan man generera både värme och elektricitet på ett hållbart sätt.





- ▲ *Figur 2:* Biomassa kan användas för att tillverka nya material och användas istället för plaster och kompositmaterial som idag använder fossila källor. Forskarna tar idag fram allt från elektroniska delar, solceller, förpackningar och byggmaterial av biomassa.

Att producera biobränslen från biomassa har blivit alltmer populärt de senaste åren. En av fördelarna är att man kan använda biomassan i flytande form och därmed direkt ersätta bensin och diesel i de flesta fordon. För att omvandla fast biomassa, som till exempel träflis, till bensin eller diesel behövs flera omvandlingssteg i stora industriella processer. För att omvandlingen ska ha en positiv inverkan på klimatet behöver processerna ge mer energi än de förbrukar, och biomassan måste dessutom framställas på ett hållbart sätt.

Nästan all bioetanol och biodiesel idag kommer från odlad majs, vete, soja och raps. Matgrödorna innehåller mycket socker och oljor

och är därför relativt enkla att omvandla till bioetanol och biodiesel. Men här tillkommer en annan utmaning än klimatet – den så kallade *mat-bränsle-problematiken*. Tyvärr finns det en risk att odlingsbara jordar kommer att överanvändas för att producera stora mängder biobränslen. Detta skulle göra att det odlades mindre mat åt jordens befolkning, vilket i sin tur skulle göra maten dyrare och drabba de fattigaste i världen hårdast.

Därför är biomassa från jordbruks- och skogsavfall, hushållsavfall och särskilda energigrödor bättre att använda för energiändamål. Energigrödor kan odlas på outnyttjad åkermark och landområden som inte passar för jordbruk. Bara i Sverige uppskattas det att nära en halv miljon hektar skulle kunna användas för produktion av till exempel salix, rörfilen och andra snabbväxande energigrödor som trivs i vårt kallare klimat. I varmare länder går det att odla snabbväxande arter som exempelvis eukalyptus, elefantgräs och jatropha, beroende på klimat och vattentillgång.

Att utnyttja jordbruks- och skogsavfall för att göra biobränslen har också en enorm potential som nästan inte alls utnyttjas idag. Det finns många nya tekniker för att omvandla sådant svårare avfall från både skogs- och jordbruk för att tillverka allt från flygbränsle, diesel och bensin till vätgas, men än så länge är dessa processer inte lönsamma. För att de ska bli lönsamma behöver man framförallt effektivisera insamlingen av avfallet. Ofta kallas dessa biobränslen för andra eller tredje generationens biodrivmedel, då de är mer hållbara och inte konkurrerar med livsmedelsproduktion.

I fotosyntesen tar växter upp koldioxid från luften för att bilda biomassa. När vi tillverkar saker av biomassan – till exempel hus och möbler av trä – så innebär det en lagring av kol. Om kolet kan lagras i mer än hundra år kallas det för *negativa utsläpp*. Produkten *biokol* från biomassa har på senare år fått stor uppmärksamhet för att den skulle kunna bidra till negativa CO<sub>2</sub>-utsläpp. Biokolet kan dels användas som material i många olika tillämpningar, men ses främst som en stor jordförbättrare som kan hålla både viktiga näringsämnen och stora mängder fukt i våra åkrar. Om vi använde

biokol i jordbruket så skulle vi inte bara lagra kolet i tusentals år utan även kunna använda mindre konstgödsel på åkrarna och få mindre problem med övergödning i våra sjöar och samtidigt få bättre skördar.

Men nyckelfrågan kvarstår: Hur kan vi få tillräckligt med biomassa för att producera all mat, allt djurfoder och all bioenergi som behövs för framtidens befolkning? Biomassa har som tidigare nämnts många användningsområden där olika sorters biomassa lämpar sig olika bra till olika produkter. En möjlighet i framtiden vore därför att bygga bioraffinaderier där man kan producera många olika produkter från biomassan och utnyttja dess fulla potential till högvärdiga produkter, både till material, el och biobränslen och utnyttja all överflödig värme i processerna. För att detta ska bli verklighet behövs dock stora investeringar.

Om vi använder biomassan på ett hållbart sätt kommer den räcka långt – både till människan och till alla andra livsformer på vår jord.

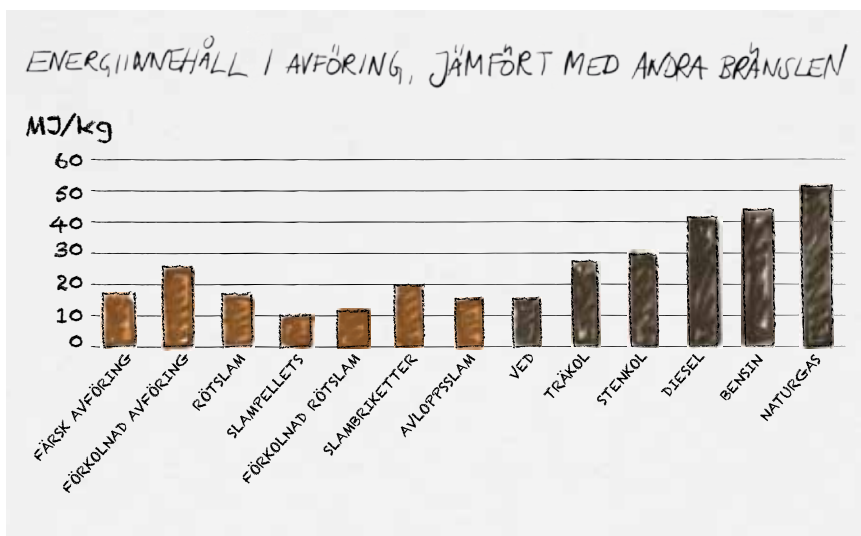


# ENERGI FRÅN EXKRET – EN AV JORDENS MEST RIKLIGA RESURSER

~~~~~  
Daniel Ddiba

Idag, år 2022, finns 7,9 miljarder människor på jorden. I medeltal genererar varje person cirka 1,5 liter exkret per dag. Det innebär att den samlade mängden kiss och bajs från jordens befolkning räcker till att fylla åtminstone 4 700 olympiska simbassänger – varje dag! Å ena sidan kan exkret ses som en hälsorisk som bör fraktas så långt som möjligt från där vi lever och bor. Å andra sidan kan det betraktas som en värdefull tillgång som användas för borde samhällets bästa. Utöver ädelmetaller som guld och silver innehåller exkret näringsämnen och avsevärda mängder energi. Energiinnehållet är visserligen inte lika högt som i fossila bränslen, men står sig väl i jämförelse med fasta bränslen som träkol och ved (se Figur 1).

Människan har länge känt till att exkret innehåller stora mängder energi. Kunskapen utvecklades parallellt med vår förståelse för energiinnehållet i andra former av biomassa, som gödsel, matavfall och andra former av organiskt avfall. Den belgiske forskaren Jan Baptista Van Helmont observerade på 1600-talet att ruttnande materia avgav brännbara gaser. Upptäckten var en föregångare till senare arbeten av Humphrey Davy, Arthur Buswell och andra forskare, om hur anaerob nedbrytning (nedbrytning som görs av mikroorganismer som inte behöver tillgång till syre) går till. Men långt dessförinnan hade biogas använts för att värma assyriska bad på 900-talet före vår tideräkning. Och såväl arkeologiska som bib-



- ▲ *Figur 1: Energiinnehåll i olika former av exkret, jämfört med vanliga fasta och flytande bränslen. En MJ (megajoule) motsvarar 0,278 kWh (kilowatt-timmar).*

liska källor tyder på att torkad avföring från djur och människor användes som bränsle i antikens Persien, Egypten och Babylon.

I Kina finns anaerob nedbrytning av avloppsvatten beskriven så långt tillbaka i tiden som på 1200-talet, medan Indien invigde sin första anläggning för anaerob nedbrytning 1859. I England byggdes septiktankar med nedbrytare från 1895, där gasen som bildades användes för gatubelysning. I Sverige började anaerob nedbrytning vid reningsverk utvecklas på 1940-talet. På 1970-talet hade intresset för energiåtervinning från exkret spridits över världen, dels på grund av energikrisen under detta årtionde och vårt sökande efter alternativa energikällor. I dag återvinns energi från exkret på flera sätt och för olika användningsområden beroende på lokala förutsättningar.

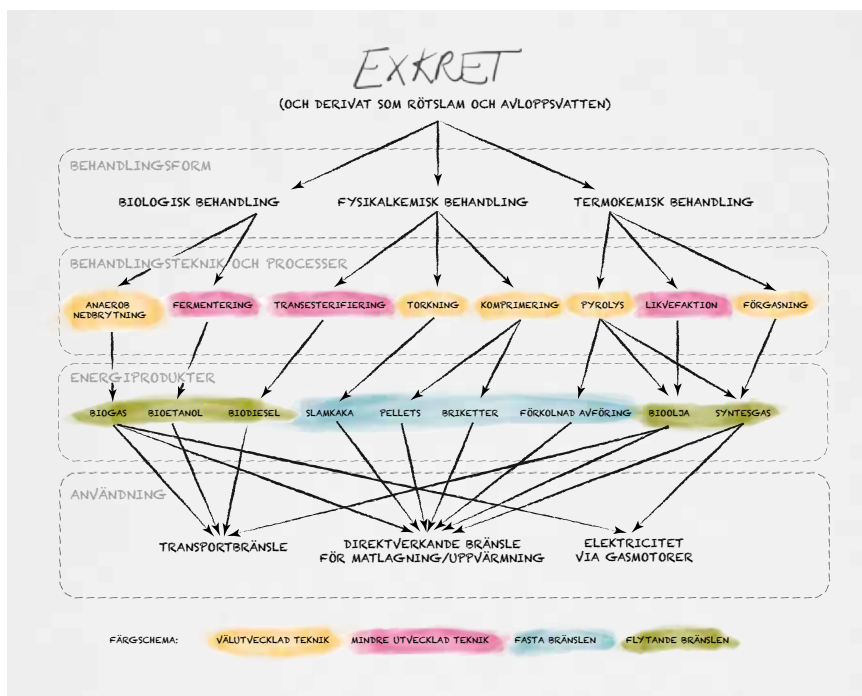
ENERGIFORMER SOM KAN ÅTERVINNAS FRÅN EXKRET

Innan exkret kan omvandlas till användbar energi behöver den genomgå något slags behandling. Sådana behandlingstekniker kan vara biologiska, fysikalkemiska eller termokemiska (Figur 2). Den anaeroba nedbrytningen som beskrevs i föregående avsnitt är ett exempel på biologisk behandlingsteknik (med hjälp av mikroorganismer). Torkning och komprimering är exempel på fysikalkemiska tekniker, medan termokemiska tekniker involverar höga temperaturer i behandlingen. Behandlingarna ger i huvudsak två former av bränslen: fasta och flytande.

Fasta bränslen finns i former av briketter, pellets och slamkaka, och kan tillverkas från rötslam, avloppsslam eller direkt från avföring genom olika fysikalkemiska tekniker. Ett annat sätt är att använda termokemiska tekniker för att skapa förkolnad avföring – ett bränsle med hög energidensitet som ser mer ut som trä- eller stenkol. Briketter, pellets och förkolnad avföring kan brännas som de är eller matas in i förgasare för att skapa syntesgas (ä. *syngas*, en blandning av kolmonoxid och vätgas) – och därefter elektricitet.

Dessa fasta former används i stor utsträckning i låg- och medelinkomstländer för hushållsändamål som matlagning och uppvärmning. Industriell användning i ångpannor och masugnar är vanligare i höginkomstländer. Cementindustrin har till exempel använt avloppsslam som ett bränsle sedan årtionden tillbaka. Slamkaka används också i vissa värmeverk för fjärrvärme, och 27 procent av allt avloppsslam i EU går årligen till just värmeverk.

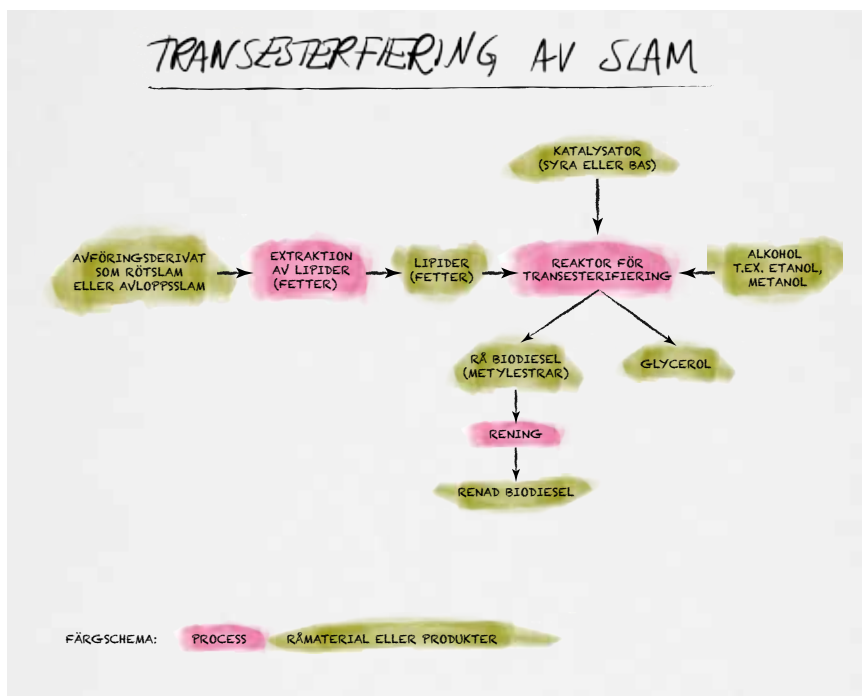
Den mest välkända formen av flytande bränsle från exkret är biogas. Biogas kan produceras genom anaerob nedbrytning av rötslam och avloppsslam i olika sammanhang. Små rötktammare i hushållsstorlek är vanliga på landsbygden i låg- och medelinkomstländer, med hundratals miljoner sådana system i Asien och Afrika söder om Sahara. Stora biogasanläggningar finns i centraliserade reningsverk i många städer i Europa och Nordamerika, och blir allt vanligare i snabbväxande städer i Asien, Latinamerika och Afrika. Biogas kan användas direkt i spisar för matlagning, i



▲ *Figur 2:* Tekniker, produkter och användningsområden för energiåtervinning från exkret.

lampor för belysning och i värmepannor för uppvärmning. Det kan också användas i motorer för att skapa värme och elektricitet, eller behandlas ytterligare för att bli fordonsbränsle eller matas in i ledningssystem för naturgas.

Utöver biogas finns flera andra slags flytande bränslen som kan framställas från exkret. Bioetanol kan skapas från jäsning (biologisk behandling) av slam eller färsk avföring, medan biodiesel kan skapas med hjälp av transesterifiering (fysikalkemisk behandling) av slam (Figur 3). Likvefaktion (termokemisk behandling) av slam kan också användas för att skapa bioolja. Dessa produkter används



▲ *Figur 3:* Processer och produkter vid transesterifiering för produktion av biodiesel.

i första hand som transportbränsle. Torkat rötslam och avloppsslam kan också pyrolyseras (termokemisk behandling) för att skapa syntesgas och bioolja, där biooljan behandlas ytterligare för att bli transportbränsle och syntesgasen används i gasmotorer för att generera värme och elektricitet.

Jäsning, transesterifiering och likvefaktion är relativt nya tekniker när det gäller energiåtervinning från exkret och det finns i dagsläget inte många storskaliga kommersiella anläggningar där teknikerna används. Däremot har de använts i stor utsträckning med andra typer av råmaterial, t.ex. fermentering av energigrödor,

transesterifiering av vegetabiliska oljor och likvefaktion av skogsrester (se även kapitlet om biomassa).

Utöver de tekniker för energiåtervinning som nämns ovan är ett annat, indirekt tillvägagångssätt att fånga upp värme från reningsverkens vattenreningsprocesser. Dessa processer skapar mycket värme och genom att använda värmeväxlare eller liknande tekniker kan värmen fångas in och användas för fjärrvärme eller andra tillämpningar. Exempel på den här användningen ses framför allt i städer i kallare klimat, som Stockholm och Oslo.

HUR ÅTERVINNING AV ENERGI FRÅN EXKRET BIDRAR TILL HÅLLBAR UTVECKLING

Cirka två miljarder människor, särskilt i låg- och medelinkomstländer, är beroende av träbaserade bränslen som ved och träkol för matlagning. Det här är en viktig drivkraft till avskogning och de efterföljande effekterna på miljön. Att byta ut dessa träbaserade bränslen med bränslen från exkret skulle kunna öka tillgången till energi samtidigt som avskogningen minskar. Särskilt i städer skulle en stor befolkning kunna ge upphov till en lika stor mängd råmaterial för sådana bränslen, både för matlagning och för att driva industrier. För en stad som Kampala i Uganda, med en befolkning på omkring 1,6 miljoner, skulle fasta bränslen från exkret och annat organiskt avfall kunna ersätta ungefär en fjärdedel av stadens konsumtion av träbaserade bränslen. Om all exkret i världen kunde omvandlas till biogas så skulle det räcka för att förse åtminstone 138 miljoner hushåll med elektricitet, vilket motsvarar den sammanlagda populationen i Brasilien, Indonesien och Etiopien.

Genom att ersätta träbaserade bränslen med fasta bränslen från exkret skulle vi kunna minska avskogningen och bevara skogar som absorberar koldioxidutsläpp. Det skulle också kunna utgöra en grund för att byta ut fossila bränslen som diesel, och därmed minska kolutsläppen. I många städer runt om i världen genererar reningsverk energi genom att producera biogas från avloppsslam. I Sverige finns åtminstone 134 sådana reningsverk med biogasproduktion, som

tillsammans står för en tredjedel av landets produktion av biogas. Merparten av biogasen uppgraderas och används som bränsle i fordon. Utsläppen av växthusgaser från en genomsnittlig bil som kör på uppgraderad biogas är cirka 27 gram koldioxidkvivalenter per kilometer, att jämföra med 167 gram för bensin och 137 gram för diesel.

ENERGI FRÅN EXKRET

– UTMANINGAR OCH MÖJLIGA LÖSNINGAR

Utöver alla fördelar som finns att vinna på att återvinna energi från exkret, finns även en del utmaningar. Till att börja med är energi bara en av många återvinningsbara resurser som finns i exkret. Andra resurser är näringsämnen, vatten och biobaserade material som bioplaster, enzymer, mineraler och metaller. Vissa former av energiåtervinning skulle kunna medföra att andra resurser går förlorade, vilket gör att avvägningar måste göras. Ett exempel är när rötslam används för att göra briketter för matlagning, eftersom näringsämnena i briketterna inte kan återvinnas från askan. Andra former av energiåtervinning kan kombineras med återvinning av andra resurser. Ett exempel är när biogas genereras från avloppsslam och det överblivna materialet kan behandlas och användas som gödsel i jordbruket. Men vi måste även ta in logistikfrågorna som uppstår i sammanlänkningen av reningssystemet med energi- och jordbrukssystem. När *näringsämnena* återvinns från exkret i städer måste produkterna (t.ex. avloppsslam) fraktas långa sträckor innan de når jordbruksområdena. Å andra sidan kan den återvunna *energin* (t.ex. biogas) användas i samma stad som den produceras. När vi planerar för att återvinna energi från reningssystemet i en stad måste vi därför ta hänsyn till vilka typer av synergier och avvägningar som den valda formen av energiåtervinning kan medföra. Eftersom de flesta näringsämnena finns i urin och det mesta av energin finns i avföring är en möjlig väg att separera dessa från varandra, så att olika resurser kan återvinnas genom olika processer.

Det finns även tekniska och praktiska utmaningar med att återvinna energi från avföring. I många städer där storskaliga anaeroba

nedbrytningsanläggningar har anlagts vid reningsverken kan metanläckor uppstå och bidra till utsläppen av växthusgaser. I en del låg- och medelinkomstländer som infört storskaliga program för biogas-rötkammare för hushållsbruk har otillräcklig teknisk kapacitet lett till utmaningar i att hålla programmen vid liv. Som en följd har en del utrustning övergetts, medan andra delar fortfarande används men med negativa socioekonomiska och miljömässiga konsekvenser eftersom de används på ett undermåligt sätt.

Både produktionen och användningen av energi från exkret kan leda till risker för människors hälsa. Det här gäller i synnerhet tekniker som medför fysisk kontakt med exkret, som manuell produktion av briketter från rötslam. Andra tekniker med mycket mindre kontakt inkluderar storskalig biogasproduktion vid reningsverk. Personal som är inblandad i behandling av avlopps- eller rötslam för att återvinna energi, riskerar att exponeras både för sjukdomsalstrande mikroorganismer och för kemikalier som används i processen. Det är därför väldigt viktigt med skyddsutrustning, liksom med vaccinationer exempelvis mot hepatit A och B. Att använda vissa energiprodukter från avföring kan också medföra hälsorisker. Till exempel kan användning av briketter för att laga mat inomhus medföra utsläpp av partiklar och kolmonoxid som bidrar till föroreningar i inomhusluften. Dock bidrar träkol och ved också till luftföroreningar, och i vissa fall mycket mer än fasta bränslen från exkret. Fasta bränslen som producerats på rätt sätt av exkret innebär sällan att användaren exponeras för sjukdomsalstrande mikroorganismer. Att enbart använda sådana bränslen i industrin skulle kunna minska hälsoriskerna, eftersom det är lättare att kontrollera utsläpp där än i enskilda hushåll.

SLUTSATSER

Vid slutet av detta århundrade beräknas jordens befolkning ha stigit till över tio miljarder människor. Det är en stor utmaning att förse den växande befolkningen med tillräckligt med energi samtidigt som vi måste begränsa klimatförändringarna. Återvunnen energi

från exkret skulle kunna bli en väsentlig del av samhällets energimix, särskilt i städer som ju både har tillgång till stora mängder råmaterial och stor efterfrågan på energi.

Det finns redan etablerade tekniker som kan skalas upp för att samla in energin som är inbäddad i exkret. Pågående teknikutveckling kommer att öppna upp fler möjligheter och möjligen lösa en del av utmaningarna som är kopplade till återvinningen av energi i dag. Förhoppningsvis kommer det en dag när den här rikliga källan till hållbar energi inte längre spolas ner i avloppet, utan används för att fylla miljarder människors behov av energi.



TILLBAKA TILL FRAMTIDEN MED VÄTGAS

~~~~~  
*Ann Cornell*

”Ja, mina vänner, jag tror, att vattnet en dag skall komma att användas såsom bränsle, att vätet och syret, som bilda detsamma, skola, använda var för sig eller gemensamt, lämna en outtömlig värme- och ljuskälla av en intensitet, som stenkolen inte kunna besitta.”

Citatet kommer från Jules Vernes äventyrsroman *Den hemlighetsfulla ön*, som publicerades 1874. Boken beskriver hur en grupp människor flyr från ett krig för att slutligen bli strandsatta på en öde ö. Färden till ön gjordes med en ballong fylld med vätgas, vilket var en av de första kommersiella användningarna av vätgas. Med åren har det visat sig att Jules Verne var riktigt bra på att förutspå framtiden. Idag ses ersättningen av fossila bränslen med vätgas som en nyckel i omställningen till ett hållbart energisystem.

Väte (H) är det lättaste av alla grundämnen. Det är också det vanligast förekommande ämnet i universum, och återfinns i solen och de flesta andra stjärnor. Vätgas består av vätemolekyler med två sammansatta väteatomer ( $H_2$ ). Gasen är ogiftig, färglös och saknar såväl lukt som smak. Det engelska namnet på väte är *hydrogen*, vilket kommer från grekiskans *hydro* (vatten) och *genes* (uppkomst), och grundar sig på att vatten bildas vid förbränning av vätgas. Vätgas har en hög energidensitet (mängd energi per massenhet, t.ex. gram),

---

◀ *Figur 1:* Ballongfärder var en av de första kommersiella användningarna av vätgas.

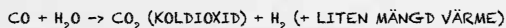
nästan tre gånger så hög som bensen, vilket gör den till ett attraktivt bränsle. Eftersom vätgas samtidigt har en låg energidensitet per volymenhet (t.ex. liter) är lagringen av gasen en viktig utmaning.

Vätgas har identifierats som en viktig energibärare (för lagring och transport av energi) i energisystemet. Den spelar också en avgörande roll för att göra tillverkningsindustrin mindre beroende av kolbaserade bränslen, till exempel för en framtida fossilfri produktion av stål. Nyligen har både EU och ett antal enskilda länder runtom i världen, inklusive Sverige, lanserat vätgasstrategier med målet att bli kolneutrala – det vill säga att ländernas utsläpp och upptag av kol är i balans.

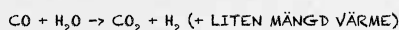
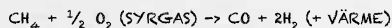
## ATT PRODUCERA VÄTGAS

I hela världen används omkring 70 miljoner ton ren vätgas per år, och ytterligare 45 miljoner ton där vätgasen ingår i olika gasblandningar. Vätgasen i forna tiders ballonger och luftskepp framställdes genom att behandla metallskrot med syra, men idag finns mycket effektivare metoder. Merparten av dagens vätgas framställs från naturgas vid raffinaderier. Tyvärr är växthusgasen koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) en biprodukt vid dessa processer.

När vätgas framställs genom behandling av naturgas med vattenånga (*Steam Methane Reforming, SMR*), blir de kemiska reaktionerna:



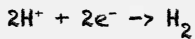
Om man istället tillsätter syrgas blir reaktionerna:



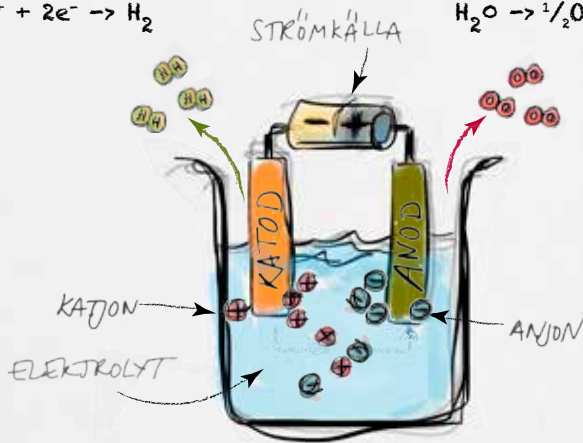
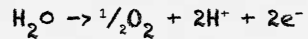


## ELEKTROLYTISK CELL

VÄTGAS,  $H_2$   
PRODUCERAS



SYRGAS,  $O_2$   
PRODUCERAS

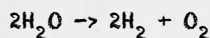


▲ Figur 2: Schematisk bild av en elektrolytisk cell (elektrolysör).

En annan metod för små- och storskalig produktion av vätgas är *elektrolys* (se Figur 1). Här för man en elektrisk ström mellan två elektroder i en elektrolyt (t.ex. saltlösning) för att bilda vätgas vid den negativa elektroden (katoden) och syrgas vid den positiva

(anoden). (Senare i kapitlet kommer vi att se att förhållandet är det omvända i en *bränslecell*: Där är den negativa vätgaselektroden anod och den positiva syrgaselektroden katod.) Till skillnad från när naturgas utgör råmaterialet, är elektrolys ett sätt att producera fossilfri vätgas – om elektriciteten som används för att driva processen kommer från förnybara källor. Idag framställs mindre än fem procent av världens vätgas via elektrolys, och då oftast som en produkt från kloralkalifabriker där salt och elektricitet används för att göra klorgas, kaustiksoda och vätgas.

De nya vätgasstrategierna förutser stora ökningar i vätgasproduktionen från elektrolys. Till exempel förutspår EU en 40-faldig ökning av produktionskapaciteten i Europa under åren 2021–2030, med vattenelektrolys som den dominerande processen. Inom kommersiell vattenelektrolys är det i nuläget främst tre tekniker som används: alkalisk elektrolys (Alkaline Water Hydrolysis, AWE), protonutbytesmembran (*Proton Exchange Membrane Water Electrolysis*, PEMWE) och elektrolys med fast elektrolyt (*Solid Oxide Water Electrolysis*, SOWE). De två förstnämnda teknikerna utförs vid temperaturer under 100°C medan SOWE kräver 700–900°C. I samtliga tre är den totala reaktionen



där vätgas bildas vid katoden och syrgas vid anoden. De tre teknikerna har olika egenskaper (se Tabell 1), där AWE är den mest beprövade metoden för storskaligt bruk, medan PEMWE har fördelen av att vara en mindre utrymmeskrävande, mer energieffektiv process som kan köras i ett bredare intervall av strömstyrka. Det sistnämnda är viktigt när elektriciteten kommer från förnybara källor med varierande tillförsel, såsom sol-, vind- eller vattenkraft. Den lägsta elförbrukningen i elektrolysen har SOWE, men kräver

| TEKNIK                 | AWE<br>(Alkaline water electrolysis)                                                                 | PEMWE<br>(Proton exchange membrane water electrolysis)                            | SOWE<br>(Solid oxide water electrolysis)                                                               |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PROCESS                | VATTENELEKTROLYS MED ETT DIAFRAGMA (ETT PORÖST MATERIAL) SOM SKILJER ELEKTRODerna ÅT I ELEKTROLYTEN. | POLYMERMEMBRAN ANVÄNDS SOM ELEKTROLYT (FUNKERAR SOM EN "OMVÄND PEM-BRÄNSLECELL"). | ANVÄNDER KERAMISK OXID (FAST MATERIAL) SOM ELEKTROLYT (FUNKERAR SOM EN "OMVÄND FASTOXID-BRÄNSLECELL"). |
| TEMPERATUR             | ~ 80°C                                                                                               | 25 - 100°C                                                                        | 700 - 900°C                                                                                            |
| INDUSTRIELL ANVÄNDNING | VÄLUTVECKLAD STORSKALIG                                                                              | KOMPAKT DESIGN FLEXIBEL STRÖMSTYRKA                                               | TOGS NYLIGEN I KOMMERIELLT BRUK                                                                        |

▲ Tabell 1: Egenskaper hos elektrolysteknikerna AWE, PEMWE och SOWE.

å andra sidan höga temperaturer för att framställa vattenånga som behövs i processen.

Det finns även andra tekniker för framställning av vätgas, såsom förgasning av biomassa och kemiska reformeringsprocesser med olika kolväten som råvara. Koldioxiden som då bildas som en bi-produkt kan fångas in och lagras (*Carbon Capture and Storage, CCS*).

För att klassificera miljöeffekten av vätgas från de olika proces-serna har ett färgschema införts, se Figur 3 på sid 80.

## BRÄNSLECELLER

I en bränslecell kan en del av energin i vätgas och syrgas omvandlas till elektricitet för att till exempel driva en bil. Vätgasen tillförs som bränsle och lagras i bilen, medan syret tas direkt från luften. Och ut ur avgasröret kommer bara vatten, ingen koldioxid alls. Eftersom en bränslecell är cirka dubbelt så energieffektiv som en vanlig förbrän-

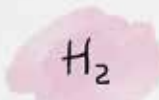
## FÄRGSHEMA FÖR KLASSIFICERING AV VÄTGAS



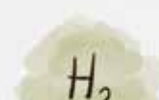
SVART OCH BRUN VÄTGAS:  
FRÅN FÖRGASNING AV KOL,  
MED UTSLÄPP AV KOLDIOXID I PROCESSEN.



BLÅ VÄTGAS: FRÅN FOSSILA KÄLLOR,  
MEN MED TEKNIK FÖR AVSKILJNING  
OCH LAGRING AV KOLDIOXID.



ROSA VÄTGAS: FRÅN ELEKTROLYS  
DÄR ELEKTRICITETEN KOMMER  
FRÅN KÄRNKRAFT.



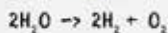
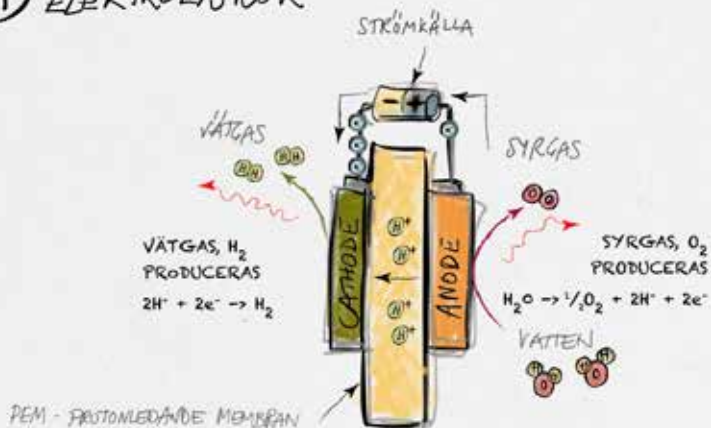
GRÖN VÄTGAS: FRÅN ELEKTROLYS  
MED ELEKTRICITET ENBART FRÅN  
FÖRNYBARA KÄLLOR.

- ▲ *Figur 3:* Färgschema för att klassificera miljöeffekten av vätgas som framställts på olika vis.
- ▶ *Figur 4:* En elektrokemisk cell som fungerar som en elektrolysör (4a) respektive en bränslecell (4b).

ningsmotor kan en bränslecellsdriven bil köra dubbelt så långt som en bensindriven bil på samma mängd energi.

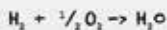
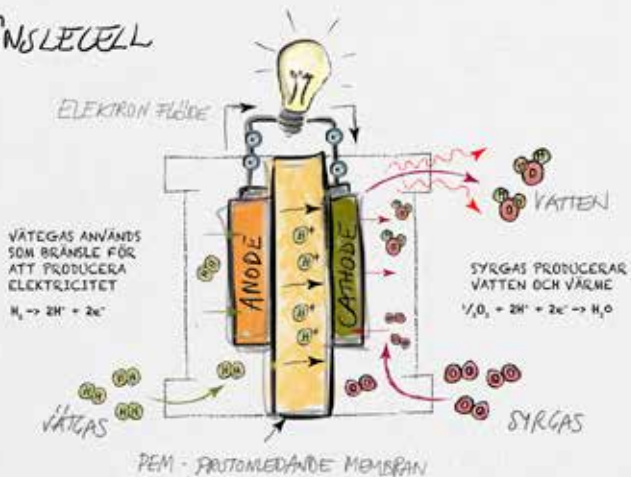
Bränslecellen fungerar som en omvänd elektrolyscell (elektrolysör). Vissa bränsleceller kan till och med fungera som både elektrolysör och bränslecell, beroende på vilken riktning den tillförda strömmen har. Figur 4 visar en elektrokemisk cell försedd med ett protonledande membran (PEM). I Figur 4a fungerar den som en

## A) ELEKTROLYSÖR



VÄTTEN + ELEKTRICITET  $\rightarrow$  VÄTGAS + SYRGAS + VÄRME

## B) BRÄNSLECELL



VÄTGAS + SYRGAS  $\rightarrow$  ELEKTRICITET + VÄRME + VÄTTEN

*elektrolysör*, som *förbrukar* elektricitet och vatten och *producerar* vätgas och syrgas. I Figur 4b används den som en *bränslecell* som *förbrukar* vätgas och syrgas och *producerar* elektricitet och vatten.

Liksom med elektrolysörer finns flera olika slags bränsleceller, där vissa arbetar vid låga temperaturer (som PEM-cellen i Figur 4b) och andra vid höga temperaturer som en omvänd fastoxid-elektrolysör (SOWE).

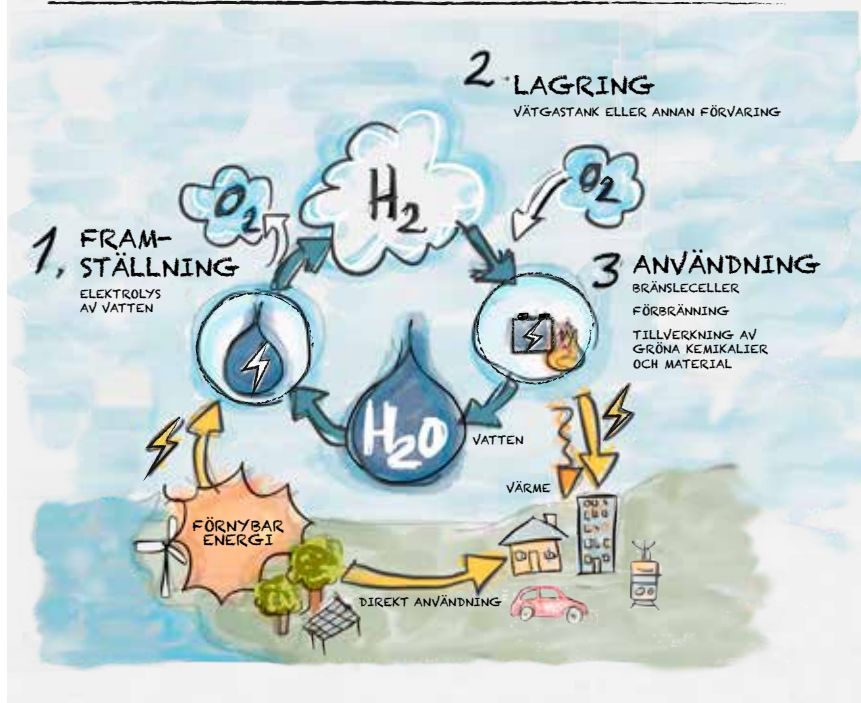
Bilar med bränsleceller kan köra cirka 10 mil på ett kilo vätgas. Att tanka tar bara ett par minuter och räcker för en resa på 50–80 mil. I nuläget finns bara ett fåtal tankningsstationer i Sverige, men eftersom intresset för bränslecellsbilar har ökat, så håller fler stationer på att byggas. År 2025 kommer det troligen att finnas mer än 50 stationer i landet.

## LAGRING AV VÄTGAS

Som nämnts tidigare i detta kapitel så finns en internationell målsättning att öka framställningen av grön vätgas, för användning som energibärare, i transporter och i processindustrin. Elektriciteten i tillverkningen av grön vätgas måste komma från förnybara energikällor. Eftersom deras elproduktion kan variera över tid – till exempel blir det ingen el från vindkraftverk när det är vindstilla – behöver framställningen av vätgas kunna anpassas efter tillgången och priset på elektricitet. Detta, i sin tur, gör det viktigt att kunna lagra vätgas för att göra oss mindre sårbara för en ojämn tillgång på elektricitet.

Vätkas kan lagras i ren form som gas eller vätska, adsorberat i/ på ett fast material, eller kemiskt bundet i exempelvis metanol. För storskaligt bruk finns flera anläggningar där vätkas lagras i underjordiska saltgrottor under tryck motsvarande några hundra bar (som jämförelse är trycket i en vanlig kolsyrepatron cirka 70 bar). Tryckkärl och rörledningar är andra lagringsalternativ ovan jord. När vätkas används för att driva transporter lagras gasen på själva fordonet. För sådan småskalig användning lagras vätkasen ofta under ett tryck på 350 eller 700 bar i behållare gjorda av material som inte släpper igenom de små vätemolekylerna.

## ETT HÅLLBART KRETSLÖPP FÖR FÖRNYBAR VÄTGAS



▲ Figur 5: Framtidens vätgassamhälle.

### KOMBINERAD PRODUKTION, ANVÄNDNING OCH LAGRING AV VÄTGAS I ETT FRAMTIDA VÄTGASSAMHÄLLE

I en framtida fossilfri värld kommer vätgas att framställas genom elektrolys med elektricitet från förnybara källor som vind- och solkraft. Gasen kommer att lagras som en energibärare för senare bruk, för att till exempel framställa kemikalier, användas som bränsle i bilar eller generera elektricitet i bränsleceller. Värmen, som är en biprodukt både vid elektrolys och från bränsleceller, kan användas

för exempelvis fjärrvärme. Elektricitet, vätgas och värme kommer att distribueras i samhället via olika nätverk, där systemen styrs med hjälp av artificiell intelligens.

## SÄKERHET

Hur är det med säkerheten då? Hindenburgkatastrofen i Lakehurst, USA, 1937 är troligen den mest kända olyckan där vätgas är inblandat. Trettiosex människor dog när den stora zeppelinaren gick upp i lågor, vilket ledde till slutet för passagerartrafiken med vätgasfyllda ballonger. Vätgas har en hög energitäthet per massenhet och brinner snabbt. Och energin som krävs för att antända vätgas är mycket lägre än den som krävs för förbränning av bensen. Dock kan inte vätgas fatta eld i en behållare som enbart innehåller vätgas – ett oxiderande ämne som syre behövs för att brand ska kunna uppstå. Och eftersom vätgas är omkring 14 gånger lättare än luft stiger och sprids den snabbt till lägre och säkrare koncentrationer om en läcka skulle uppstå. Idag har vätgas använts i industriell skala i mer än 100 år och under denna tid har vi samlat på oss stor kunskap om hur gasen ska hanteras för att vara lika säker eller säkrare än andra bränslen i det moderna samhället.

## FRAMTIDEN

Vad behövs då för att visionen om vätgassamhället ska bli verklighet? Vätgasstrategierna pekar både på vägar framåt och på viktiga utmaningar. I *Vätgasstrategi för fossilfri konkurrenskraft* som lanserades 2021 av regeringens initiativ *Fossilfritt Sverige* ingår bland annat en plan för elnätet och en ny infrastruktur för produktion av vätgas med målsättningar för bland annat elektrolysör-kapacitet. Andra delar i strategin handlar om ny lagstiftning och marknadsvillkor för att främja grön vätgas. Bland andra åtgärder föreslagna för regeringen finns till exempel ekonomiskt stöd för att stärka grön vätgas liksom dess forskning och utveckling, och ökad kompetens inom området.

I Europa kostar vätgas idag ungefär 1,5 Euro per kilo för grå vätgas, 2 Euro/kg för blå vätgas och 2,5–5,5 Euro/kg för grön vät-



gas. För att grön vätgas ska bli mer konkurrenskraftig behövs både mer forskning och utveckling om utformning av elektrolysörer, och en effektivare tillverkning av dessa. Ett positivt tecken är att kostnaden för elektrolysatorer har sjunkit med cirka 60 procent den senaste tioårsperioden. Kostnaden förväntas sjunka med ytterligare 50 procent till 2030. Olika sätt att sänka kostnader inkluderar förbättringar av material i elektroder och membran, utveckling av effektivare elektrolysprocesser, och att dra stordriftsfördelar av en uppskalad tillverkning av elektrolysörer.

Det är snart 150 år sedan *Den hemlighetsfulla ön* publicerades, med Jules Vernes spådom om att vatten i framtiden skulle användas som bränsle. Vad skrivs det för skönlitterära verk idag som kommer att bli del av morgondagens verklighet?



# MATERIAL – EN PÅTAGLIG UTMANING FÖR SAMHÄLLETS ELEKTRIFIERING

~~~~~  
Kerstin Forsberg & Christopher Hulme

Elektrifieringen av samhället innebär en övergång från dagens (icke-elektriska) teknologier, såsom fossildrivna transporter till alternativ som drivs med elektricitet. Omställningen, som är nödvändig av miljöskäl, framställs ofta som en lösning på klimatförändringarna och andra stora utmaningar. Men den skapar också nya problem som sällan tas upp, men som kan få besvärliga konsekvenser om vi inte kan lösa dem i tid. Det här kapitlet handlar om ett sådant problem: Tillgången till material som behövs för elektriska teknologier. Vissa av dessa material är svåra att framställa, eller förekommer i väldigt begränsade mängder. De kallas *kritiska material*, eftersom tillgången är osäker och det är troligt att de kommer att spela en viktig roll i samhället. Både EU och USA publicerar egna listor över sådana kritiska material. Eftersom samhällets efterfrågan på materialen kommer att fortsätta öka, behöver vi hitta sätt att möta denna efterfrågan. De flesta experter är eniga om att det kommer att krävas mer gruvdrift för att klara detta. Gruvdrift kräver i sin tur stora mängder energi och ger i dagsläget upphov till stora utsläpp av växthusgaser. Mängden kritiska material som går att utvinna från gruvor är också begränsad. För att undvika svåra konsekvenser på lång sikt måste vi vara försiktiga med att binda oss till planer som kräver sådana material, och säkerställa att planerna i sin helhet är hållbara.

VARFÖR VILL VI ELEKTRIFIERA SAMHÄLLET?

Elektrifieringen av samhället pågår – och går allt snabbare. Politiker, forskare och företag är ense om att vi måste ersätta fossila bränslen med elektricitet, som alstras på rena, förnybara sätt. På så vis kan vi minska utsläppen av växthusgaser, bevara naturtillgångar och bli ett mer hållbart samhälle med en ljusare framtid för våra barn och barnbarn. Det finns inga tvivel om att elektrifieringen bör fortsätta. Men vi måste försäkra oss om att tillgången på material är säkrad och att den inte riskerar att göra elektrifiering ohållbar.

VAD KRÄVS FÖR ATT UPPNÅ ETT MER ELEKTRIFIERAT SAMHÄLLE?

Det mest uppenbara svaret är: tillräckligt med elektricitet. Men elektriciteten måste även vara ren, förnybar och tillgången måste vara jämn och pålitlig. Det här är en enorm utmaning som diskuteras i flera andra kapitel i denna antologi. Det andra som behövs är *materialen* som ingår i de elektriska apparater som vi vill använda. Även detta är en stor utmaning.

ATT SKAPA EN MATERIALKRIS

En del läsare kanske minns oljekriserna på 1970-talet, när osäkerhet kring tillgången på olja ledde till skenande priser som på kort tid sköt i höjden med 400 procent. De två största kriserna inleddes med att några leverantörer slutade sälja sin olja, vilket ledde till drastiska förändringar i världsekonomin. Utan noggrann planering och forskning skulle dagens intensiva arbete för att elektrifiera samhället lätt kunna leda till en liknande ”materialkris”, där vissa material blir så svåra att få tag på att deras priser stiger snabbt till en nivå som gör elektrifieringen ogenomförbar. En sådan kris skulle kunna uppstå om ett land slutar leverera ett visst material, eller om efterfrågan på ett material ökar snabbare än det kan produceras. Sådana scenarier går att undvika om problemet upptäcks i tid och rätt åtgärder sätts in.

SÄLLSYNTA JORDARTSMETALLER

Vindturbiner är en viktig teknik för att generera fossilfri elektricitet. I Storbritannien stod vindkraft för 19 procent av landets elförsörjning år 2021; vid en viss tidpunkt stod den för hela 59 procent. Sveriges regering meddelade i början av 2022 sina planer på att kraftigt bygga ut den svenska kapaciteten för vindkraft. Vindturbiner innehåller kraftfulla magneter där *sällsynta jordartsmetaller* (eng. *rare earth metals*) utgör en viktig del – särskilt metallerna neodym, dysprosium och samarium. Den sällsynta jordartsmetallen skandium används i vissa bränsleceller som använder fasta oxider som elektrolyt (se även kapitlet om vätgas). Som namnet antyder är tillgången på sällsynta jordartsmetaller begränsad. Många är dyra och kräver stora mängder energi för att utvinnas ur malm. Det är därtill vanligt att flera olika sällsynta jordartsmetaller förekommer i samma malm, och eftersom de har snarlika kemiska egenskaper är de svåra att separera från varandra. Det här skapar problem när metallerna grävs fram tillsammans, men deras efterfrågan skiljer sig åt. För att inte slösa med dyrbara tillgångar måste metallerna som inte är lika eftersökta på marknaden kunna lagras för framtida behov.

LITIUM OCH KOBOLT

Övergången till elektriska bilar har lett till en snabb utveckling inom batteriteknik. Bilbatterierna liknar de som återfinns i mobiltelefoner och bärbara datorer, och använder elektrisk energi för att bryta isär litiumföreningar till litiumjoner och andra ämnen. Så länge batteriets positiva och negativa ändar inte är sammankopplade så "väntar" ämnena bara i batteriet. Men när apparaten används kopplas ändarna samman, vilket leder till att litiumjonerna slår sig samman med andra ämnen, skapar litiumföreningar och frigör elektrisk energi. Tekniken medför förstås en efterfrågan på litium. I elektriska bilar, där batteriet måste lagra så mycket energi som möjligt, innehåller litiumföreningarna ofta grundämnet kobolt.

Litium är problematiskt eftersom stora mängder koldioxid bildas när metallen utvinns ur malm. Den här energiförbrukningen går

att minska avsevärt genom att återvinna litium. Tyvärr är det ofta svårt att genomföra återvinningen i praktiken, eftersom komponenterna som innehåller litium är små och svåra att samla in och separera från andra metaller. I många fall används litium dessutom i föreningar som är komplicerade att återvinna och omvandla till former som kan användas i nya material. Detta har hittills inte utgjort något problem för tillgången på litium, men den snabba ökningen av litiumbaserade batterier skulle framöver kunna bli en utmaning i elektrifieringen och digitaliseringen av samhället. Vi behöver ha detta i åtanke så det inte blir ett hinder i utvecklingen.

Omkring hälften av all kobolt produceras i Demokratiska republiken Kongo. Landet anses vara mycket instabilt (det femte minst stabila i världen, enligt the Fragile States Index 2021). Det går åt enorma mängder energi för att utvinna kobolt från malm. Koboltproduktionen leder också till stora utsläpp av koldioxid. Samtliga dessa problem kan minskas genom återvinning av kobolt.

KISEL

En annan viktig källa till elektricitet är solenergi (särskilt fotovoltaisk energi). Det finns uppskattningar som säger att om solceller som täckte en yta motsvarande Tyskland placerades i Sahara skulle de ge tillräckligt med elektricitet för att täcka hela världens behov. Många solceller som genererar elektricitet är baserade på kisel. Tillgången på kisel är visserligen god (kisel finns i sanden på de flesta stränder), men produktionen av solceller kräver stora mängder energi. Det finns två typer av kisel-solceller: Monokristallina celler, som använder väldigt stora kiselkristaller, och polykristallina celler som använder ”normalt” kisel. Monokristallina celler produceras med en teknik som kräver mycket energi, ofta i form av elektricitet. Tillverkningen av polykristallina celler kräver mindre energi, men genererar också mindre el än monokristallina. Det är svårt att säga hur mycket elektricitet en solpanel genererar, dels eftersom det finns många olika slags paneler på marknaden, men också eftersom det i hög grad beror på var i världen solpanelen placeras. I Europa

går det överlag åt fyra gånger mer energi att tillverka solpaneler än vad de genererar under ett år. Det innebär att en solpanel måste vara i drift i fyra år innan den börjar ge ett nettobidrag till elproduktionen (se även kapitlet om elektricitet). Denna tidsrymd kallas för *energiåterbetalningstid* (eng. *energy payback time*).

I Sverige genererar solceller varje år en sammanlagd effekt på omkring 400 MW, och en mängd elektrisk energi motsvarande 300 GWh. En del av elektriciteten används omedelbart, medan en del sparas i fysisk form; antingen genom att smälta ett material som sedan kommer att frysa och avge energi när det behövs, eller genom att pumpa upp vatten som sedan kan släppas ner för att generera elektricitet vid behov (den här tekniken fungerar som vindturbiner och kan därför kräva magneter med sällsynta jordartsmetaller). En del lagras även i batterier (som kan kräva litium och kobolt).

VANADIN

Vanadin finns med på EU:s lista över kritiska råmaterial. De huvudsakliga globala producenterna är Kina, Sydafrika och Ryssland, medan inget vanadin alls utvinns från malm i Europa. Vanadin är viktigt för lagring av energi och används i både redox-flödesbatterier och i en ny generation litiumjonbatterier. Därtill används legeringar av vanadin och andra metaller i kärnreaktorer.

HUR FÅR VI TILLGÅNG TILL MATERIALEN VI BEHÖVER?

GRUVDRIFT

Ett uppenbart sätt skulle vara att starta fler gruvor och gräva upp mer av materialen ur jorden. Det finns en bred acceptans om att vi kommer att behöva göra detta för att kunna elektrifiera och digitalisera samhället. Men det innebär inte att det är möjligt att gräva upp hur mycket material som helst, under hur lång tid som helst. När vi vill uppskatta hur mycket material som finns kvar att gräva upp använder vi konceptet ”reserver”. Dessa reserver motsvarar mängden material som kan utvinnas *med ekonomisk vinst till rådande pris*. Det

innebär att reserverna kan *öka* om nya fyndigheter hittas under jord eller om priserna på materialet går upp. På motsvarande vis kan reserverna *minska* om priset går ner. Vanligtvis räcker reserverna kortare tid än det faktiska antalet år som materialet skulle räcka för, eftersom priserna på material ofta går upp när reserverna sjunker, vilket gör att mer material kan utvinnas med vinst.

Som nämnades tidigare kräver gruvdrift stora mängder energi. Vi använder begreppet "förkroppsligad energi" (eng. *embodied energy*) för att beskriva den totala mängd energi som krävs för att omvandla ett material från sin naturliga form i jorden till ett användbart material. I den förkroppsligade energin för *jungfruligt* (nyproducerat, ej återvunnet) material ingår energin som krävs för gruvdrift, transport och behandling. Koldioxidavtrycket mäts också för samma steg. För *återvunna material* är det istället energin (och koldioxidavtrycket) som går åt vid insamling av avfall, transport och alla processer som krävs för att omvandla avfallet till ett användbart material.

ÅTERVINNING

Återvinning kräver ofta mindre energi och släpper ut mindre koldioxid än gruvdrift och dess relaterade processer. Genom att återvinna kan vi dessutom förlänga reserverna – istället för att tära på tillgångarna under jord skapar vi nytt material från avfall. Det här är särskilt viktigt för att minska sårbarheten kring material som i huvudsak kontrolleras eller produceras av ett enda land, såsom kobolt och vissa sällsynta jordartsmetaller, som överlag kontrolleras av Demokratiska republiken Kongo respektive Kina.

HUR KAN VI STÄRKA ÅTERVINNINGEN?

För att utveckla och förbättra återvinningen behöver många olika aktörer i samhället involveras – även den breda allmänheten. Apparaterna/enheterna som ska återvinnas måste samlas in, sorteras och plockas isär på bästa möjliga sätt. Vissa kan gå att renovera och använda igen, i ett "andra liv". Till exempel är det möjligt

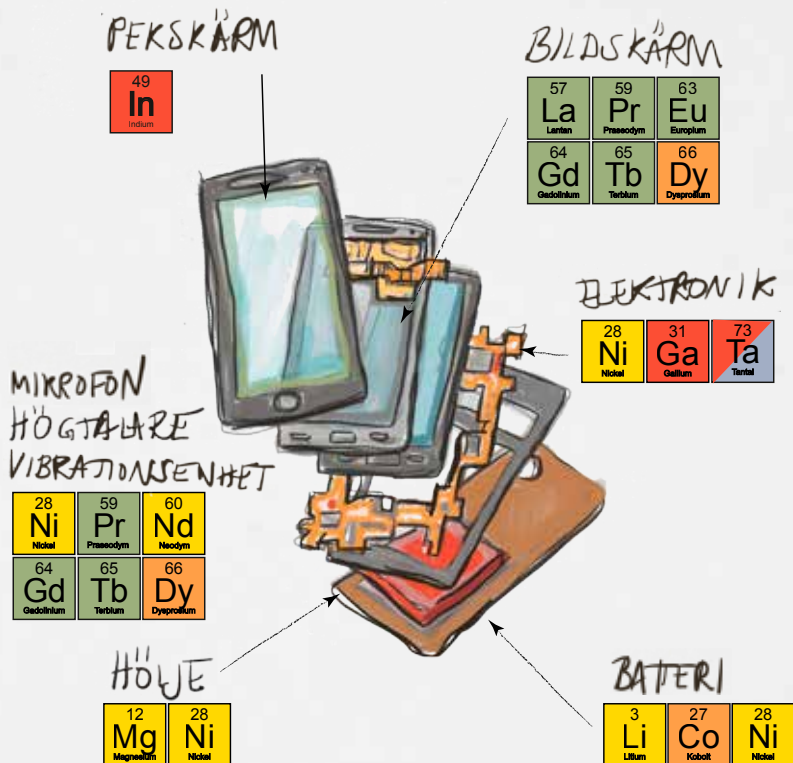
TILLGÅNG, ENERGI AVTRYCK OCH KOLDIOXID AVTRYCK FÖR NÅGRA KRITISKA MATERIAL

	KOBOLT	LITIUM	NEODYMIUM- MAGNET	KISEL
PRIS (EUR/KG)	65	65	21	10
2020 PRODUKTION (MT/ÅR)	0.15	0.03	0.02	11
2020 RESERVER (MT)	7.2	13	140	106
TILLGÅNG (ANTAL ÅR)	50	> 400	7000	MANY!
FÖRKROPPSLIGAD ENERGI (NYPRODUCERAT) (MJ/KG)	2000	600	55	120
KOLDIOXIDAVTRYCK (NYPRODUCERAT) (KG/KG)	43	46	6	5
FÖRKROPPSLIGAD ENERGI (ÅTERVUNNET) (MJ/KG)	24	70	19	2.4
KOLDIOXIDAVTRYCK (ÅTERVUNNET) (KG/KG)	2	5.5	1.5	0.8
PROCENT ÅTERVUNNET MATERIAL I NUVARANDE MÄNGD TILLGÄNGLIGT MATERIAL	30%	< 1%	50%	0.6%

- ▲ *Tabell 1:* Tabellen visar tillgång, pris, samt energi- och koldioxidavtryck för några kritiska material. MT = megaton = miljard kilogram. MJ = megajoule. Koldioxidavtrycket anges i kilogram koldioxid per kilogram material.

att renovera litiumbatterier från elfordon och ge dem ett andra liv som enheter för energilagring. I det här fallet är det viktigt att

METALLER I EN SMARTMOBIL



BRIST PÅ GRUNDÄMNEN - EN SMARTMOBIL BESTÅR AV ETT 30-TAL GRUNDÄMNEN.
ÖVER HÄLFTEN KOMMER I FRAMTIDEN VARA EN BRISTVARA.

 ALLVARLIG BRIST DE
KOMMANDE 100 ÅREN

 TILLGÅNGEN ÄR OSÄKER

 TILLGÅNGEN OSÄKER
EFTERSOM METALLER HAR
MÅNGA ANDRA
ANVÄNDNINGSGRÄNSOMRÅDEN

 ÖKAD RISK FÖR BRIST
DÅ ANVÄNDNINGEN ÖKAR

 SÄKRAD TILLGÅNG

det finns dokumentation om batteriets ursprung, hälsotillstånd och tidigare användning, vilket kräver en välutvecklad blockkedjeteknik i spårbarheten hos batteriets komponenter (det ska gå att se exakt var varje del kommer ifrån, och vad som har hänt i varje steg i komponenternas och batteriets liv). För att möjliggöra ett andra liv för batterier behöver standardiseringar och regelverk utvecklas. Även säkerhetsaspekterna kring att transportera och lagra batterier är viktiga och behöver studeras mer.

Återvinningen av uttjänta apparater kan vara utmanande, särskilt när de innehåller en blandning av olika material. Men när materialen är värdefulla finns det ändå en stor potential i att återvinna dessa tillgångar. Ibland kan halterna av kritiska material i uttjänta apparater med råge överstiga de som återfinns i malm. Ur ett återvinningsperspektiv kan den nuvarande trenden att minska mängden kritiska material i apparater i sig bli en utmaning. Om vinsten med att utvinna material i återvinningsprocessen sjunker skulle det nämligen kunna minska motivationen att återvinna.

Det finns även potential i att förbättra apparaters *utförmning* för återvinning, exempelvis genom att välja material som är lättare att återvinna eller genom att göra apparaten lättare att plocka isär. Vid återvinning av batterier laddas de vanligtvis ur, plockas isär för hand, för att sedan strimlas och behandlas mekaniskt för att skapa så kallad "svart massa" (eng. *black mass*). I behandlingen ingår värme och fysisk separation av beståndsdelarna med hjälp av magnetism, luftströmmar eller siktning. Svart massa är en ny produkt på återvinningsmarknaden och kan ha olika sammansättning beroende på batteriernas kemiska egenskaper och hur deras återvinning gått till. När tillgångar återvinns från svart massa och andra

- ◀ *Figur 1:* En smartmobil innehåller ett flertal grundämnen som kommer att vara bristvaror i framtiden. Källa: <https://www.birmingham.ac.uk/documents/college-eps/energy/policy/policy-comission-securing-technology-critical-metals-for-britain.pdf> and <https://www.euchems.eu/euchems-periodic-table/>

uttjänta apparater kan processen antingen baseras på pyrometallurgi (värmebehandling) eller hydrometallurgi (vattenlösningar) eller en kombination. Allteftersom ny teknik utvecklas, med exempelvis nya kemiska sammansättningar i materialen, uppstår behov av nya återvinningsprocesser där olika tekniker för återvinning kombineras. Vi behöver därför utveckla våra kunskaper om varje enskild teknik för att kunna optimera det återvunna materialets mängd och kvalitet, och skapa processer som är hållbara för såväl ekonomi som miljö.

UTHÅLLIGA ELKRAFTNÄT – EN FÖRUTSÄTTNING FÖR FRAMTIDENS ENERGISYSTEM

~~~~~  
*Lina Bertling Tjernberg*

Elektricitet anses vara en av mänsklighetens största uppfinningar. Elektrifieringen revolutionerade samhället från att skapa ljus i hem till att möjliggöra industriell utveckling. Idag står vi inför ett dilemma: Vi använder alltmer energi, samtidigt som vi måste minska våra utsläpp av koldioxid. En viktig del av lösningen på detta dilemma är att använda mer energi från förnyelsebara källor som sol och vind. Men vi behöver också ett uthålligt elkraftnät.

## ELKRAFTNÄT – TRANSPORTERAR OCH BALANSERAR ELEKTRISK ENERGI

Elkraftnätet (eller *elnätet*) är infrastrukturen som gör det möjligt att transportera elektrisk energi, elektricitet, från producent till konsument (se Figur 1). Elkraftnätet består av komponenter som luftledningar, kablar, transformatorer, samt kopplingsanordningar (mellan olika spänningsnivåer och komponenter) och omvandlare (exempelvis mellan likström och växelström). Dagens elkraftnät är uppbyggt av enstaka elkraftverk som förser stora geografiska områden med elektrisk energi via kraftledningar.

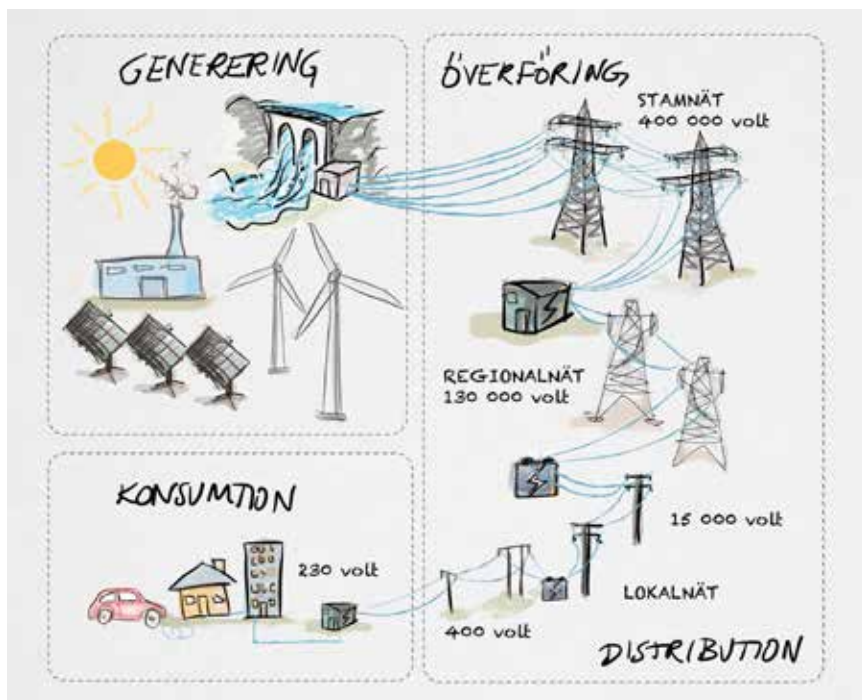
Elnätet kan delas in i tre delar: *stamnät* (även kallat transmissionsnät), *regionalt* respektive *lokalt* elnät (se Figur 1). Spänningen i kraftledningarna är extremt hög i stamnätet (uppemot 400 000 volt). Den sänks sedan successivt via transformatorer i stamnätet och de regionala och lokala elnäten för att ligga på en

mycket lägre nivå när den når konsumenten (230 volt i våra eluttag). Den höga spänningen gör det möjligt att transportera elektricitet långa sträckor utan att energi går förlorad på vägen; medan den lägre spänningen gör elen säkrare för konsumenten att använda.

Grundutmaningen i elkraftnätet är att hålla en konstant balans mellan produktion och förbrukning av elektricitet i det elektriska systemet. I denna balans ingår en stabil spänningsnivå och frekvens (antalet svängningar i växelströmmen per tidsenhet – se även kapitlet om elektricitet). En stor del av komponenterna i elkraftsystemet har därför som syfte att justera frekvens och spänningsnivå. En annan viktig funktion för komponenter är att kunna koppla ifrån och isolera delar i elkraftnätet exempelvis efter ett elektriskt fel eller för att utföra underhåll.

Hur tåligt kraftnätet är mot störningar avgörs av den tillgängliga *rotationsenergin* i det elektriska systemet. Rotationsenergin – även kallad *svängmassan* – består av den lagrade rörelseenergin i systemet. Vi kan ta ett vattenkraftverk som exempel: Här omvandlas vattnets rörelseenergi till mekanisk energi i turbiner, som i sin tur driver generatorer som alstrar elektrisk energi. De roterande delarna i turbinerna och generatorerna har en mekanisk tröghet mot förändringar i rotationens hastighet som begränsar hur fort de kan accelereras eller bromsas (tänk på en karusell på en lekplats, och hur antalet barn på karusellen påverkar hur snabbt den kan bromsas eller sättas igång). Den här trögheten hjälper till att upprätthålla balansen i elsystemet genom att vara en kortsiktig buffert. Ju större svängmassa (ju fler barn i karusellen) desto mer energi finns lagrad och kan användas för att stabilisera frekvensen.

Sverige har haft en globalt ledande roll i forskning, utveckling och innovation inom elkraftnät. Allmänna Svenska Elektriska AB (ASEA), som grundades 1883, utvecklade ny teknik som gjorde det möjligt att överföra el mycket långa distanser (även i havet) med hög spänning och likström. Världens första kommersiella högspänningskabel med likström (HVDC) driftsattes 1954 och var en sjökabel mellan svenska fastlandet och Gotland. ASEA tillverkade



▲ Figur 1: Schematisk bild av elkraftnätet.

denna HVDC-kabel för det statligt ägda kraftbolaget Vattenfall i ett projekt lett av den världskände uppfinnaren och ingenjören Uno Lamm. Han omnämns ofta som fadern för högspänd likström. Under sin livstid utvecklade han hela 150 patent inom området, och 1980 instiftade den internationella organisationen *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) ett pris i hans ära. Priset delas årligen ut till en person som gjort stordåd för utveckling inom högspänningsteknik. År 2017 erkändes den första HVDC kabeln som en IEEE milstolpe – en utmärkelse liknande UNESCO:s världsarv, fast inom teknik.

## SMARTA ELNÄT

Det globala energisystemet befinner sig i en gigantisk omställning. Målet är att använda mindre fossila bränslen och mer förnybara energikällor, och att använda energin på ett effektivare sätt. Det har gjorts stora satsningar runt om i världen på att bygga ut och modernisera elkraftnäten för att nå dessa mål. Ett av de viktigaste sätten att nå målen är *smarta elnät*.

Det finns många exempel på nyttor av smarta elnät. Hushållens efterfrågan på el kan optimeras med hjälp av smarta mätare, pris-sättning av elen i realtid och smarta vitvaror (se även kapitlet om hemmen i det smarta elnätet). El kan levereras med kontrollerad spänning och effekt, där de smarta mätarna automatiskt rapporterar driftavbrott. Bolag kan fjärrövervaka högspänningskomponenter och kraftstationer för att planera och genomföra förbyggande underhåll av exempelvis transformatorer eller kraftledningar.

De olika teknologierna som ingår i smarta elnät kan delas upp i tio kategorier:

1. *Hemenergikontroll*: en enhet som reagerar på signaler om elpris för att optimera värmeförbrukning och användning av eldrivna apparater såsom tvättmaskiner.
2. *Informations-och kommunikationsteknik (IKT)*: enheter som övervakar och ger konsumenten återkoppling om den verkliga elförbrukningen beroende på marknadspriset.
3. *Efterfrågestyrning*: kombinerade smarta mätare och skärmar som visualiserar energiförbrukningen.
4. *Smarta mätare*: registrerar förbrukningen av elektrisk energi i intervaller om en timme eller mindre och kommunicerar denna information till verktyg för övervakning och fakturering.
5. *Hemskärm (in-home-display)*: en skärm som visar el- och energiförbrukning i hemmet.
6. *Energilagring*: gör det möjligt att balansera produktion och konsumtion, och utjämna stora variationer.



7. *Virtuellt kraftverk (Virtual Power Plant, VPP)*: samordnar småskalig elproduktion, som vindturbiner och småskalig vattenkraft, och gör det möjligt för nya aktörer att stödja kraftsystemet vid toppbelastning.
8. *Koordinering av distribuerade energiresurser*: kan exempelvis koordinera lokal produktion av el från solceller, ansluten fjärrvärme eller värmepump, batterisystem och elfordon och även mindre vattenkraftverk eller vindkraftverk för ett mindre samhälle.
9. *Ett centralt kontrollsystem*: hanterar de olika funktionerna i det smarta elnätet.
10. *Laddningsoptimering för elfordon*: gör det enkelt att integrera elfordon i kraftsystemet, för lägre kostnad, och bättre effekt.

De smarta mätarna innebar en revolution i synen på elkonsumenter. I traditionella elkraftnät hade konsumenten bara varit en nod i överföringssystemet. Med smarta mätare kan konsumenten nu få kontinuerlig information om sin egen konsumtion; hur mycket el som *förbrukas* av enskilda apparater i hushållet, eller hur mycket el hushållet *producerar* med exempelvis solceller – så kallad *mikroproduktion*.

En annan central del i omställningen av elkraftnätet är att integrera el från *intermittent kraftproduktion* som från sol och vind. Kraften som skapas från dessa källor är inte jämn över tid, utan beror på väderförhållanden – vind och solsken. Detta innebär flera utmaningar för elkraftnätet som både måste kunna skapa balans mellan produktionen och konsumtionen av elektricitet, och hålla den balansen utan hjälp från mer konstanta kraftkällor, som exempelvis vattenkraft. Det framtida elkraftnätet blir ett alltmer komplext tekniskt system med en blandning av växelström och likström, lokal och fjärrproducerad el. Andra nya aspekter är elfordon, som kan utgöra både en belastning (vid laddning av batterier), liksom en källa till elektricitet (när batterier kopplas in på elnätet för att *bidra* med el).

Två nyckelområden i omställningen för det smarta elkraftnätet är *standardisering* och *interoperabilitet*. I standardiseringen ingår vilka regler och riktlinjer som ska gälla, liksom vilka egenskaper elkraftnätet har. Den är nödvändig för både säkerhet och för att sänka kostnader. *Interoperabilitet* är förmågan hos olika system och organisationer att arbeta tillsammans. I det smarta elkraftnätet kopplas system för elektricitet ihop med system för information (tele- och datanät). Sammankopplingen gör det möjligt att automatisera och kommunicera via nuvarande och framtida elnät. En viktig drivkraft för investeringar i smarta elnät är att stora delar av dagens elnät är ålderstiget och behöver moderniseras. Andra viktiga drivkrafter är förbättrad kundupplevelse, ökad effektivitet i drift av elnätet, och ökad effektivitet i hur energin används.

## **GREENGRIDS – INTELLIGENTA FLEXIBLA OCH CIRKULÄRA ELNÄT MED VISION OM ETT UTHÅLLIGT SAMHÄLLE**

Ett intelligent och anpassningsbart elkraftnät är en nyckel för hållbar, kostnadseffektiv och motståndskraftig (eng. *resilient*) elförsörjning. I framtiden kommer elkraftnätet att behöva belastas hårdare, och med högre krav på tillförlitlighet, övervakning och komponenter. Nya elkraftnät kan dra nytta av material och komponenter som är utformade med hänsyn till cirkulär ekonomi. Miljoner elkunder kan bidra till elkraftnätet med lokal småskalig elproduktion från solpaneler och med anslutna elfordon för laddning eller lagring. Digital teknik kommer användas i enheter och system för att förbättra övervakning och kontroll av komponenter i elkraftnätet.

I visionen om det uthålliga elkraftnätet (GreenGrids) delas elektrifieringens ingredienser för ett hållbart samhälle upp i tre delar (se Figur 2).

1. *Det intelligenta och anpassningsbara nätet*, som skapar nya värden för elkraftverk och elkunder. Detta elnät kommer att möjliggöra en pålitlig och smidig



▲ *Figur 2:* GreenGrids vision för ett uthålligt samhälle med tre sammanlänkade tematiska områden.

övergång mot ett uthålligt energisystem och tillföra ett betydande värde till ekonomi, samhälle och miljö. Hur vi ska kunna utnyttja den digitala tekniken fullt ut i det intelligenta nätet är en utmaning som kräver stora investeringar och samarbete mellan myndigheter, akademi och industri. Arbetet kräver tvärvetenskaplig forskning inom kontroll, kommunikation, dataanalys och AI, och djuplodande kunskap om kraftsystem och kraftelektronik, med involvering av alla intressenter.

2. *Den flexibla nätinfrastrukturen*, som integrerar förnybara energikällor och energilagringssystem för att jämna ut variationer i elproduktion. Ett flexibelt elnät skall kunna ansluta stora mängder el från intermittent produktion el från sol och vind (se även kapitel om elektricitet) utan att kompromissa med elnätets stabilitet. Att utveckla teknik och system till framtidens mer flexibla elnät är en utmaning. Utmaningen gäller inte bara att utveckla ett ekonomiskt och hållbart system, utan också att göra det med hög hastighet. Klimatet kräver en omedelbar minskning av användningen av fossila bränslen. Att minska användning av fossila bränslen är även motiverat för att bli oberoende av import av fossila bränslen. Det finns ett stort behov av vidareutveckling av teknik för flexibla nät och effektiv lagring och styrning. Det finns också ett stort behov av att vidareutveckla teknik och marknader för systemtjänster för att få en effektiv och pålitlig kontinuerlig strömförsörjning. Se även kapitel kring elektricitet för beskrivning av olika tekniker för energilagring.
3. *Utveckling av komponenter, material och miljövänliga lösningar*. Här ingår ny teknik för transformator-, kabel- och kopplingsteknik, förbättrade material och kunskaper om deras åldrande för att kunna planera för underhåll och utbyte. Komponenter och deras material utgör ryggraden i elkraftnätet. I framtidens flexibla, dynamiska och optimerade elnät behöver komponenter klara av ökade påfrestningar och säkerställa en pålitlig och effektiv nätdrift. I utvecklingen av dessa lösningar behöver forskningen utgå från cirkulär ekonomi. Cirkulär ekonomi innebär ett kretslopp från design av komponenter, driftsättning i elnätet och underhåll under livslängden, möjlig livslängdsförlängning, och slutligen

att återanvända material. Målet är att minska inverkan på naturen och minska utsläpp av klimatgaser liksom koldioxid. Den cirkulära ekonomin kan även innebära att komponenter, liksom material, kan användas i flera olika funktioner. Exempelvis att batterisystem först används i elbilar och därefter i en andra livslängd för energilagring. Det finns redan idag utvecklade tekniklösningar där begagnade batterier görs om till mobila elbilsaddare som kan placeras ut där behov finns.

Användarperspektivet är centralt för att vi ska lyckas i omställningen mot ett uthålligt elkraftnät och ett uthålligt energisystem. Särskilt frågan om användarnas *acceptans* behöver tas i beaktande. Här är inställningen ”not in my backyard” (”inte på min bakgård”) en utmaning – till exempel ”gärna vindkraft, men inte här” eller ”gärna solpaneler, men inte på min grannes tak”. Inom exempelvis vindkraft har ett stort arbete utförts för samverkan mellan olika berörda aktörer exempelvis militär, rennäring och kommuner liksom industrin och investerare. I fokus ligger lyhördhet och dialoger och ett behov av kunskapsbas och utbildning.

För att möta framtidens behov behöver vi både en starkt utbyggd produktion av el liksom motsvarande kapacitet för att kunna transportera den. Kommuner har fokuserat på att bidra till omställningen genom att minska ledtider för miljötillstånd och ekonomiskt stöd för utbyggnad. Fler styrmedel behöver dock utvecklas för att alla olika parter skall motiveras att bidra i omställningen.

## **UTMANINGAR FÖR SVERIGE**

Smarta elnät öppnar för nya innovationer och kostnadseffektivitet. Dessutom bidrar de till ett uthålligt energisystem, högre BNP och fler jobb. Men vilka är då utmaningarna? Vilka är erfarenheterna som Sverige kan dra nytta av? Samarbete och allianser är en kritisk fråga. Det är effektivt att integrera flera leverantörer och produkter (interoperabilitet), men då måste man insistera på att

dessa använder standarder och är byggda på ett sätt som tillåter användare att göra anpassningar och uppdateringar. Det är dessutom nödvändigt med omfattande tester innan tekniken tas i bruk – det är dyrt och tidskrävande, men ännu dyrare och mer tidskrävande att behöva göra om när tekniken väl är i användning.

Sverige har kommit långt när det gäller att använda el från förnybara energikällor och vi har varit ett föregångsland i att införa smarta elmätare. Nästa steg är en övergång i transportsektorn från fossila energikällor till en eldriven fordonsflotta vilket idag sker i stor omfattning. Detta i sin tur ställer krav på smarta elnät med infrastruktur för att kunna ladda fordonens batterier eller ansluta dem till nätet. Vad som behövs då är standardiserad infrastruktur, stöd till industrin så att den kan investera i teknik och sedan någon slags stimulans för att få igång marknaden. I ett nästa steg behöver man säkerställa att det finns tillräcklig kapacitet i elöverföring för att kunna ansluta nya platser för laddning. För att lösa detta i snabb takt behövs ett stort samarbete mellan olika aktörer. Exempelvis finns i Stockholm en *elektrifieringspakt* med ett mål om att 2030 enbart ha fossilfria transporter inom staden. Pakten leds av Stockholms stad och initierades tillsammans med Scania, Ellevio och Volkswagen. Alla aktörer är välkomna att vara med och arbeta för att skynda på utbyggnaden av stadens laddinfrastruktur för att uppnå målet.

Moderniseringen av elnätet ställer nya krav på kunskap och det finns brist på erfarenhet och utbildad personal. Här måste vi ställa krav på utbildningen av framtidens ingenjörer, så att behoven av denna kompetens kan fyllas.

Om vi lyckas med dessa utmaningar så kommer det uthålliga elkraftnätet göra det möjligt för framtidens elproduktion att bestå av fossilfri elproduktion. På samma sätt som internet formade utvecklingen av underhållningsindustrin genom effektiv distribution av media, kommer elnätet att underlätta ökningen av förnybar energi och omforma industrier och samhällen med en säker och flexibel tillgång till el.

## **KRIGET OCH ENERGIN – MOT ETT EUROPEISKT OBEROENDE ENERGISYSTEM**

När denna text skrivs är det krig i Europa. Ukraina invaderades den 24 februari 2022 av Ryssland. Detta leder till stora konsekvenser för människor, ekonomi, försörjningen av energi och mat, och mycket mer. Många länder har svarat med hårda sanktioner mot Ryssland och olika former av stöd till Ukraina, såsom sjukvård, vapen och energi. Sverige och flera andra länder bidrar med militärt stöd, vilket är ett paradigmskifte. Detta är en situation Europa inte varit i sedan andra världskriget och innebär en ny epok för världen.

Den 16 mars kopplades elsystemet för Ukraina–Moldavien ihop med det europeiska elkraftsystemet. Elkraftsystemet i det kontinentala Europa är världens största sammankopplade elsystem, med ett antal anslutna elsystem, som det nordiska där Sverige ingår. Elen transporteras med likström långa distanser mellan olika länder. Därefter omvandlas likströmmen till växelström och ansluts till det lokala elsystemet. Att elsystem är sammankopplade innebär att de tillsammans verkar för att hålla stabilitet och balans i systemet. Denna sammankoppling innebär att Europa nu kan stödja Ukraina med en stabil energiförsörjning.

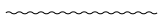
Sanktionerna mot Ryssland har stor inverkan på energiförsörjningen i världen. Ryssland står för 40 procent av världens tillgångar på fossila bränslen. Innan kriget hade Europas import av olja och naturgas från Ryssland ökat under en längre tid, med en utbyggnad av infrastruktur för överföring av framför allt naturgas. I omställningen för att minska användningen av fossila bränslen har fokus legat på att i första hand fasa ut olja och kol, vilket har lett till en ökad användning av naturgas. Här är Tyskland ett talande

exempel: De var tidiga med att stänga ner kolkraft och satsade stort på havsbaserad vindkraft och solkraft. Detta var dock inte tillräckligt för att täcka landets energibehov och man satsade därför även stort på naturgas från Ryssland. I och med kriget har behovet av alternativa energikällor och utökad elproduktion från energikällor med låga klimatutsläpp blivit än mer akut.

Kriget har tydligt visat att det inte bara är klimatmålen som kräver en omställning av energisystemet. Det är även en geopolitisk säkerhetsfråga där Europa och Sverige nu skyndsamt ställer om för en oberoende energiförsörjning.



# FRAMTIDENS KÄRNKRAFT



*Pär Olsson*

Neutronen – den oladdade partikeln i atomkärnan – upptäcktes av den brittiske fysikern James Chadwick 1932. Därefter dröjde det inte länge innan forskare började diskutera möjligheter att frigöra energi genom att klyva atomkärnor. Redan 1942 startades den första kärnreaktorn, Chicago Pile-1, men sedan blev det tyvärr atombomberna som fälldes i mitten av 40-talet som verkligen visade upp kraften från kärnklyvningar. Det dröjde till mitten av 50-talet innan denna form av energi började användas till nytta för mänskligheten, då de första kärnreaktorerna kopplades in i elkraftnätet för att förse samhället med elektricitet. Sedan dess har kärnkraften varit en omdebatterad källa till energi. Viktiga fördelar, som att kunna producera stora mängder fossilfri planerbar elektrisk energi – har ställts mot nackdelar, som risker för olyckor liknande dem i Tjernobyl 1986 eller Fukushima 2011, och hur de farliga slutprodukterna kan förvaras på ett sätt som inte utsätter nutida eller framtida generationer för skada.

Min forskning handlar om hur vi kan utveckla nya, hållbara sätt att använda kärnkraft. I det här kapitlet vill jag ta upp några av de vanligaste frågorna som jag brukar få om dagens och framtidens kärnkraft.

## **TILL ATT BÖRJA MED: HUR FUNKAR EN KÄRNREAKTOR?**

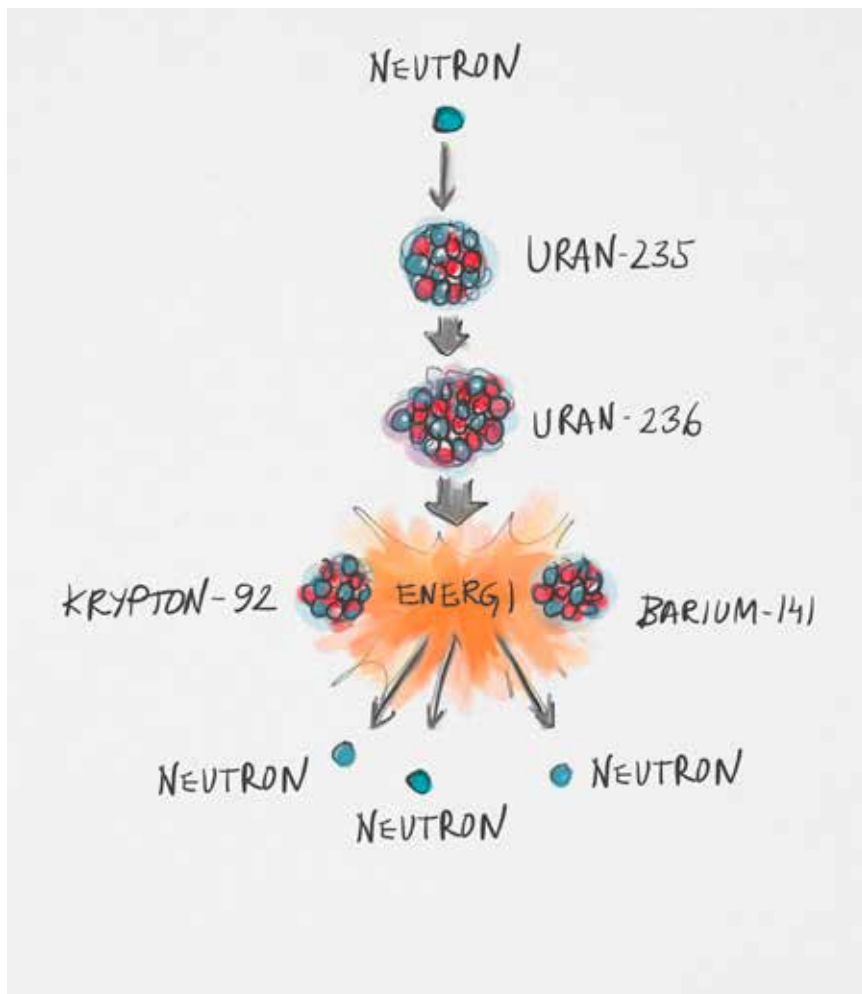
I en kärnreaktor använder man det radioaktiva grundämnet uran som bränsle för att frigöra energi. Detta sker när man klyver

urankärnorna med hjälp av neutroner. Klyvningen skapar lättare atomer – *klyvningsprodukter* – samt nya neutroner och frigör stora mängder energi (se Figur 1). Reaktorn är konstruerad så att antalet neutroner hela tiden är i balans, vilket ger upphov till en stabil och kontrollerad kedjereaktion. Flera olika sorters säkerhetsmekanismer samverkar för att hålla reaktorn stabil. De passiva mekanismerna, som drivs av fysikens lagar (t.ex. tryck eller tyngdkraft) och inte av mänsklig intervention, är de viktigaste. De neutroner som inte klyver uranatomer kan fångas upp och skapa tyngre grundämnen. Dessa är radioaktiva under mycket lång tid och gör att det använda bränslet måste slutförvaras i hundratusentals år innan det blir ofarligt för människa och natur. Tack vare den extremt höga energitätheten i uran, flera miljoner gånger högre än i till exempel kol eller olja, blir volymerna som måste slutförvaras dock relativt små.

## **I DEBATTEN OM FRAMTIDENS ENERGISYSTEM PRATAS DET MYCKET OM SMR OCH "FJÄRDE GENERATIONENS KÄRNKRAFT" – VAD ÄR DET EGENTLIGEN?**

Små modulära reaktorer, eller SMR, är ett samlingsnamn på mindre kärnreaktorer. De konstrueras av standardiserade delar (moduler) som snabbt och med hög precision kan tillverkas i en fabrik för att sedan transporteras och installeras på platsen där reaktorn ska verka. Sådana reaktorer kräver betydligt kortare byggtid, blir mer flexibla och samtidigt säkrare att använda, tack vare standardiseringen. Man brukar räkna reaktorer som kan leverera mellan 10 och 300 MW elektrisk effekt som SMR (att jämföra med en konventionell reaktor som t.ex. Forsmark 3, som ger över 1 100 MW).

Det finns redan flera mindre reaktorer i drift i världen som kan klassas som SMR. De senaste är reaktorer monterade på pråmar som finns i Sibirien och kan transporteras dit de behövs. I Storbritannien och i Kanada har man långt gångna planer att utveckla och bygga SMR för olika ändamål. Det finns ett trettiotal företag världen över, som har kommit olika långt i sin utveckling av reaktorkoncept.



▲ *Figur 1:* I en kärnreaktor klyvs urankärnor med hjälp av neutroner.

Även "fjärde generationens kärnkraft" är ett samlingsnamn för ett antal olika reaktorsystem under utveckling. Systemen har som gemensamt att de ska:

- använda bränslet betydligt effektivare än dagens kärnkraft,
- inte lämna efter sig långlivat avfall,
- vara utformade så att de inte kan orsaka olyckor med allvarliga konsekvenser,
- vara ekonomiskt konkurrenskraftiga gentemot dagens kärnkraft samt andra energislag,
- avstyra spridning av radioaktiva ämnen för vapentillverkning.

För uppfylla alla dessa krav räcker det inte med nya typer av kärnreaktorer – det krävs även andra anläggningar, framför allt fabriker för återvinning av bränsle. I dessa kan man separera det använda bränslet i klyvningsprodukter (som blir avfall) och tyngre grundämnen (som kan bli nytt bränsle). Fjärde generationen handlar alltså om ett skifte från att använda bränslet en gång, till att använda det massor av gånger, tills i princip all tillgänglig energi är slut.

Fjärde generationens kärnkraft ligger längre fram i tiden, framför allt eftersom det ännu inte är ekonomiskt lönsamt att återvinna bränslet. Det både finns och byggs olika fjärde generationens reaktorer i flera länder, men inget land har ännu beslutat att bygga upp hela systemet som behövs för att få till ett cirkulärt flöde av bränsle. Om ett land bestämmer sig för att satsa på ett sådant infrastrukturprojekt skulle det vara genomförbart inom 10–20 år.

I debatten är det inte ovanligt att SMR blandas ihop med fjärde generationen, eftersom en hel del SMR-koncept kan användas i fjärde generationens reaktorsystem. Det finns dock gott om tredje generationens SMR-koncept, som kommer att vara först ut på marknaden. Samtidigt finns det även gott om olika fjärde generationens reaktorkoncept som varken är små eller modulära.

## **VAD ÄR FÖRDELARNA MED SMR JÄMFÖRT MED DAGENS KÄRNKRAFTVERK?**

SMR kan byggas snabbare, billigare och med standardiserad hög säkerhet. De är även mer flexibla och kan användas till att

inte bara producera elektricitet, utan även andra energibärare som vätgas eller elektrobränslen (kombinationer av vätgas och andra ämnen). Många stora industrier har energibehov, antingen i form av värme eller elektricitet, i den storleken som en SMR kan erbjuda. Detta kan öppna för nya tillämpningar och placeringar av kärnteknik än den vi har idag, där SMR kan förse industrier med fossilfri och planerbar energi i olika former. Att de är relativt små och har en jämn produktion av energi, gör att de kan tillföra en stabil och trygg elförsörjning för Sverige i ett osäkert världsläge. Flera mindre kraftverk på olika ställen är mindre sårbart än när alla reaktorer samlas i stora kraftverk. I det globala perspektivet kan SMR användas för att ersätta fossila kraftverk där de står, så att de anläggningar som redan finns kan utnyttjas optimalt, så som ställverk, elledningar, brandkår och laboratorier.

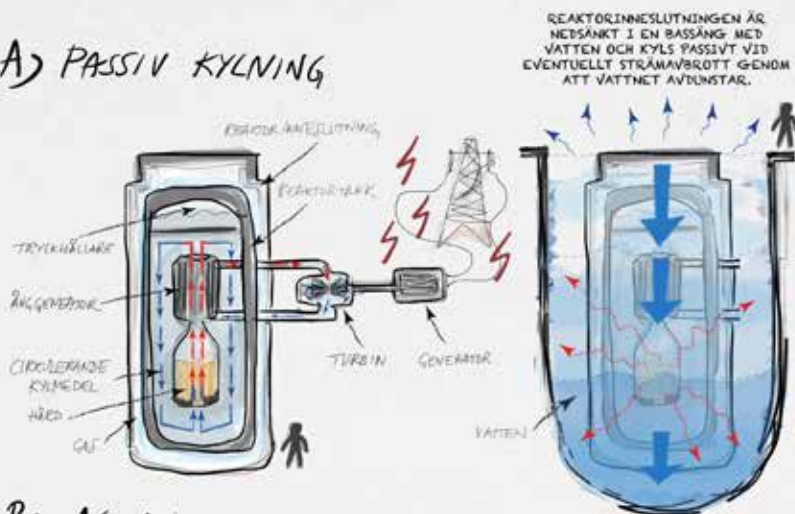
En annan fördel med små reaktorer är att fler delar av reaktorn får plats innanför de inre skyddsbarriärerna, reaktortanken (se Figur 2). Detta leder till förenklad design och högre säkerhet. Eftersom de innehåller mindre mängder radioaktiva ämnen än en stor reaktor är avskärmningen lättare att hantera, och eventuella utsläpp vid en allvarlig olycka blir mindre.

En annan fördel är att det är enklare att ordna helt passiv kylning för SMR än för stora reaktorer. Passiv kylning är en mycket viktig teknik som få vanliga kärnreaktorer har idag, men som i princip alla nya reaktorer anpassas för (se Figur 2). På de stora reaktorerna kräver detta komplicerade och dyra extrasystem, medan den mindre reaktorns stora yttre yta och mindre volym gör den lämpad för en effektiv passiv kylning.

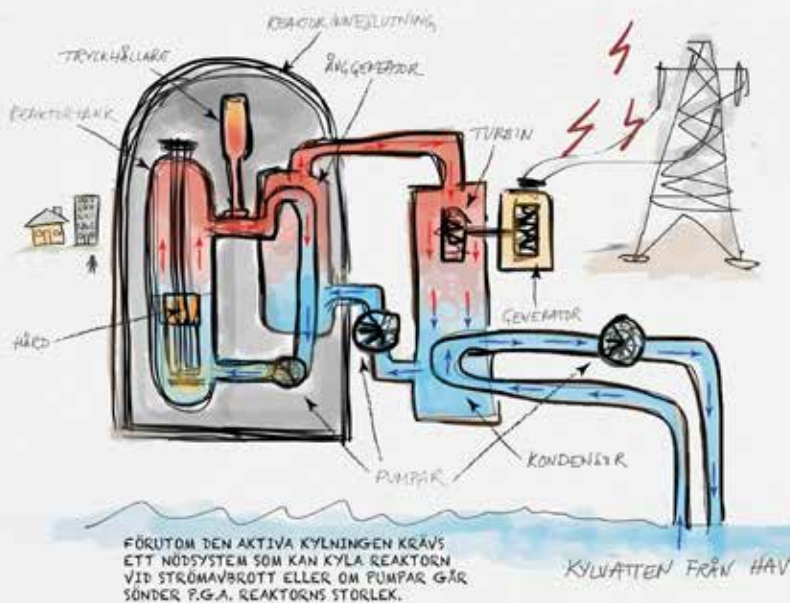
## **VILKA ÄR DE STÖRSTA UTMANINGARNA I FORSKNINGEN OCH UTVECKLINGEN KRING SMR?**

Med SMR skiftar man fokus från skalekonomi (stordrift) till en standardiseringsekonomi (färdiga ”byggsatser”) och de olika ländernas regelverk är inte anpassade för detta än. För att SMR

## A) PASSIV KYLNING



## B) AKTIV KYLNING



ska få stort internationellt genomslag så behövs ett harmoniserat regelverk, så att en reaktor som är godkänd i exempelvis USA relativt snabbt kan godkännas även i ett annat land. Här borde de olika nationella myndigheterna kunna samarbeta genom IAEA (International Atomic Energy Agency) för att sammanställa ett sådant ramverk. De SMR som baseras på vattenkylning, och alltså liknar dagens reaktorer, skulle då kunna komma ut på marknaden och etableras inom relativt kort tid.

För avancerade koncept, såsom reaktorerna som är hjärtat i fjärde generationens kärnkraft, krävs fortfarande en del forskning. Det handlar främst om vilka material som kan användas på ett hållbart och säkert sätt, men även om hur reaktorerna kan utformas för att på ett flexibelt vis producera olika energibärare (t.ex. vätgas). Man behöver också kunna testa deras inbyggda säkerhetsmekanismer i prototyp- och demonstrationsanläggningar. I Sverige har vi ett relativt samlat fokus på forskning och utveckling av SMR som är kylda med bly. Hett bly är mycket utmanande att hantera med dagens teknik, och vi håller därför på att utveckla och testa olika lösningar med avancerade stål och kompositmaterial.

## **VILKEN ROLL KOMMER SMR ATT SPELA FÖR ATT TILLGODOSE VÄRLDENS ÖKANDE ELBEHOV?**

Kärnenergi finns med som en stomme i alla scenarier för ett hållbart samhälle där vi begränsar klimatförändringarna. Om det blir SMR eller konventionell kärnkraft (stora reaktorer) som kommer att utgöra kärnan i denna stomme är en politisk men även ekonomisk

- ◀ *Figur 2:* Överst: Liten reaktor (SMR) med passiv kylning och fler delar innanför den inre skyddsbarriären. Nederst: Traditionell reaktor med aktiv kylning via pumpar. Människan och husen visar skillnaden i storlek mellan en SMR och en traditionell reaktor.

fråga. Idag är det främst i länder utanför västvärlden som vi ser nya projekt med storskalig kärnkraft, medan SMR ser ut att vinna mark oavsett region och politiskt system. Tack vare sin standardiserade produktion har SMR potential att bli betydligt billigare än konventionell kärnkraft.

Som energikälla för mänskligheten är kärnkraften fortfarande väldigt ung – det har ännu inte gått hundra år sedan idén om att klyva atomkärnor för energi började diskuteras. Idag går forskningen snabbt framåt och stora språng tas inom till exempel materialteknik för framtida kärnkraft. Var tekniken kommer att befinna sig bara ett tjugotal år in i framtiden går inte att säga. För forskare inom kärnenergi är det en spännande tid vi har framför oss.



# HEMMEN I DET SMARTA ELNÄTET

~~~~~  
Cecilia Katzeff

- Kaffe?
- Ja, tack. Och gärna en rostad brödskiva. Finns i frysen. Du behöver nog tina innan du rostar.
- OK. Jag fixar. Ska bara ta en snabb dusch först.

Så här kan ett morgonsamtal se ut i ett vanligt svenskt hushåll. Inte så fyllt av spänning kanske. Men om vi läser mellan raderna för att hitta elanvändningen blir det mer intressant. Kaffet måste ha el för att bryggas och kanske behöver kaffebönor malas i en elektrisk kaffekvarn. Brödskivan ligger i frysen, som drivs av el, och den tinas kanske i en mikro innan den hamnar i brödrosten, som också drivs av el. Så har vi förstås duschen, där varmvattnet troligen kommer från en elektrisk varmvattenberedare.

Vardagen i våra hem består av en mängd sådana här aktiviteter. Ibland är det tydligt att de inbegriper el- och energianvändning, medan det i andra fall inte är lika uppenbart. Bara genom att bo i en byggnad använder vi energi och el. Det märker vi så fort det blir strömavbrott. Vi använder alltid energin för att kunna genomföra aktiviteterna. Att använda energin är alltså inte ett självändamål för oss.

Vilka som utgör våra mest energikrävande aktiviteter kan ändras över tid. I Sverige ökar till exempel mängden vatten som vi använder för personlig hygien. Medan tidigare generationer badade en gång i veckan, är dagens norm att duscha varje dag eller till

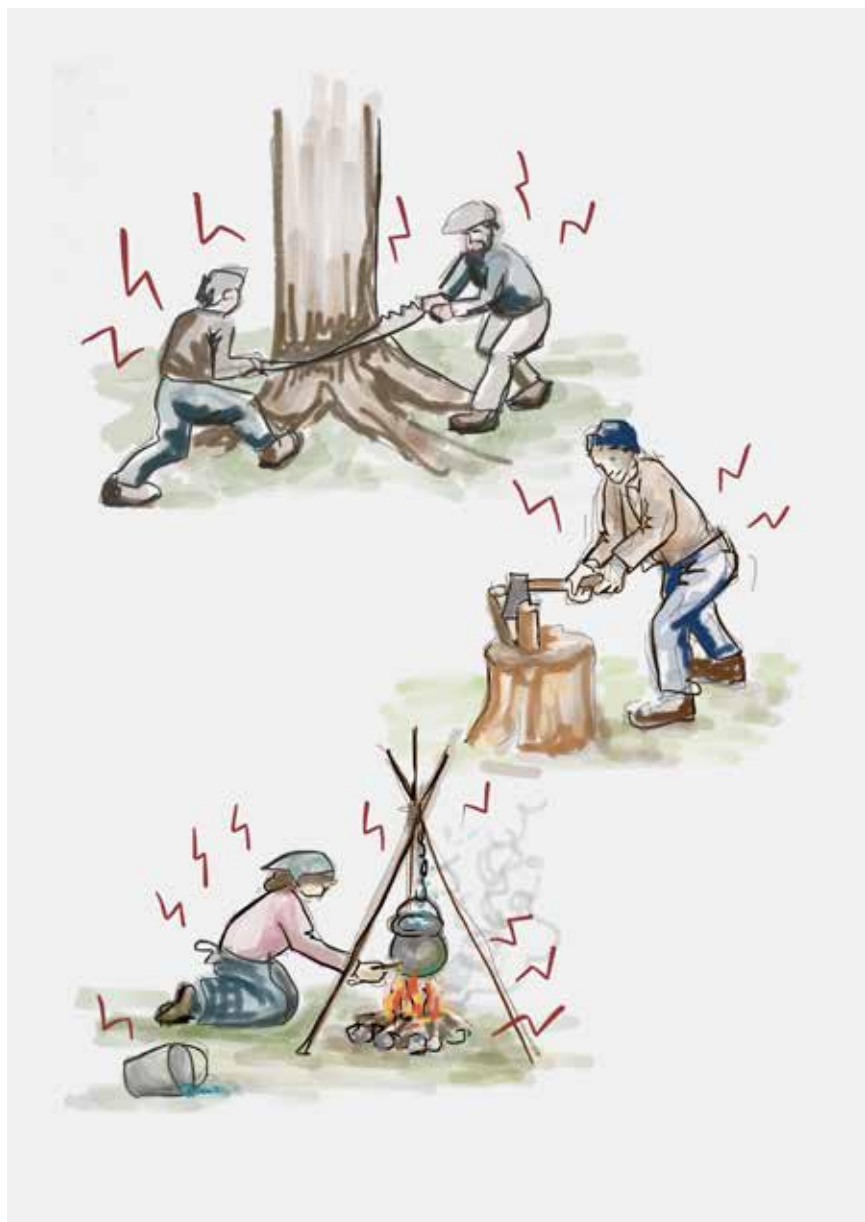
och med flera gånger om dagen. Normer förändras över tid, och påverkar våra aktiviteter och vår energianvändning.

MÄNNISKANS RELATION TILL ENERGI OCH HUR DEN HAR FÖRÄNDRATS

Fundera på hur den inledande morgondialogen hade sett ut innan vi hade elektricitet. Innan kaffet kunde kokas var vi tvungna att hugga ned träd, kapa och klyva ved, bära in den i huset, och elda för att få spisen varm. Det kändes i kroppen hur mycket energi som behövdes för att laga ett mål mat. På den här tiden hade människan ett mer direkt förhållande till energi. Med elsystemet förändrades människans förhållande till energi radikalt. När vi kunde använda el för uppvärmning, belysning, matlagning och transporter var vi inte längre beroende av det egna kroppsarbetet. Idag, i vår del av världen, har både elen och den energi som krävs för att framställa den blivit osynliga. Samtidigt finns andra samhällen där förhållandet till energi fortfarande är mer direkt.

För några år sedan fick jag och min familj besök från Zimbabwe. Jag berättade för våra gäster att jag jobbar med att synliggöra el-användning, eftersom el är så osynligt. De var intresserade men höll inte alls med. Hemma i Zimbabwe bryts strömmen ofta – och länge – och varje gång blir de smärtsamt medvetna om att de har använt den. Elens icke-existens gör den synlig, och blir beviset för att den finns. Genom att schemalägga sina elleveranser till cirka 6 timmar per dag försöker det statliga zimbabwiska elbolaget underlätta för folk att planera sin elkonsumtion. Tyvärr kan de sällan hålla den schemalagda tiden. Den oförutsägbara tillgången på el gör att mina vänner måste planera sin vardag på ett helt annat sätt än vi. De behöver passa på att tvätta, stryka, laga mat och ladda datorer när de väl har el. Fullt medvetna om att de snart kommer att bli av med den igen.

- *Figur 1:* I ett samhälle utan elektricitet har människor ett mer direkt förhållande till energi.



Vårt vardagsliv påverkas alltså i hög grad av den politiska och tekniska miljö som omger oss. Elsystemet är vad som brukar kallas ett sociotekniskt system – ett system där både människor och teknik ingår. Från att ha varit konstruerat ungefär på samma sätt i över 100 år (se kapitlet om energi i ett historiskt perspektiv) håller systemet nu på att förändras. Två utmaningar som har sporrat till förändring är dels att vi behöver minska användning av fossila energikällor och öka förnybara energikällor för produktion av el; dels den ökade användningen av el i samhället. Genom att förena forskning och innovation inom digital teknik och elsystemet har ett nytt slags elsystem skapats. Detta ”smarta” elnät innebär ett nytt sociotekniskt system med nya förväntningar på oss medborgare. Genom nya tjänster och teknik kan vår elanvändning bli mer synlig. En positiv följd kan bli att det återskapar ett mer direkt förhållande till energi. Men de smarta elnäten kan också innebära nackdelar, som vi bör vara medvetna om.

FRAMTIDENS ELSYSTEM

– SMARTA ELNÄT

Smarta elnät kan både samla in och agera på information för att hantera efterfrågan och leverans av el. De kommer innebära en genomgripande förändring av samhällets elanvändning när de införs fullt ut. Genom att kopplas till förnybara energikällor, som till exempel sol och vind, skapar de goda förutsättningar för en hållbar omställning av energisystemet.

Förnybara energikällor medför att tillgången på el blir väderberoende och ibland ojämn. Samtidigt har vi en ökad elektrifiering i samhället, vilket ytterligare ökar kraven på elnätet.

Vid vissa tidpunkter på dygnet är belastningen på elnätet högre än vid andra tidpunkter. För att elsystemet ska klara belastningen och leverera den el som behövs till hela samhället krävs en flexibel elanvändning. Här har privata hushåll en nyckelroll att spela, eftersom balansen i framtidens elnät är beroende av att hushållens elanvändning anpassas till elnätets kapacitet.

SMARTA ELNÄT

- använder *digital* teknik för att samla in och agera på vad som händer i elnätet.
- kan integrera *förnybar energi*, såsom sol- och vindkraft, i systemet.
- är flexibla och kan *balansera belastningen* i kraftnäten så elförbrukningen anpassas till mängden el som levereras.
- gör elanvändningen synlig för hushållen, via teknik som *visualiserar, automatiserar och styr* deras elanvändning.
- *ökar sårbarheten* i elsystemet.

VILKA FÖRVÄNTNINGAR/KRAV STÄLLS PÅ HUSHÅLL/ MÄNNISKORS ROLLER I DET SMARTA ELNÄTET?

På sidan 123 (överst) finns en bild på en människa i ett smart hem. Hemmet har sensorer som känner av vad som händer i rummet – till exempel närvaro, rörelse och automatiska temperatur-funktioner. Det finns också displayer där människan kan läsa av energianvändningen och få information om exempelvis hur elpriserna kommer att se ut framöver så att hen kan anpassa hemmets aktiviteter därefter. Men vilken bild förmedlas av själva människan i detta smarta hem? Själv slås jag av hur rent och städat det alltid är i dessa framtidsbilder och av hur bra de som bor där förväntas vara på att hantera den nya och smarta tekniken. Den australiensiska sociologen Yolande Strengers menar att de nya energisystemen förenklar bilden av människan till en rationell och maskulin individ. Denna individ är intresserad av sin egen energianvändning, förstår den i detalj, och vill följa den och förändra den på ett rationellt sätt utifrån information om kostnader, kilowattimmar och avtryck på miljön. Strengers kallar den bilden av människan för ”resource man”.

Hur skulle den nya tekniken kunna designas för vanligare och kanske stökigare hem som det på sidan 123 (nederst), som utöver vuxna individer också består av barn och husdjur? Hur kan tekniken ta hänsyn till en mindre effektiv tillvaro, med långsamhet i stället för snabbhet? Yolande Strengers är kritisk mot visionen som hon kallar för ”Smart Utopia” – den smarta utopin. Den skymmer sikten för det sociala sammanhang som tekniken är en del av.

Vi behöver ta hand om högen av smutsiga kläder, laga middag till en hungrig familj, och varva jobb och fritid i hemmiljön. Vi behöver förstå att sociala och beteendemässiga förändringar inte kan ske enbart genom att förse hushåll med data och teknik.

AKTIVA ELLER PASSIVA HUSHÅLL

I diskussioner kring hushållens energianvändning och smarta elnät talas det ofta om aktiva användare. Vad betyder det? Och varför är det viktigt? Att producera egen el låter ju aktivt, men aktiviteten kanske slutar när man väl har installerat sin anläggning. Att anpassa sina aktiviteter till när tillgången på el är gynnsam kan också låta aktivt. Men att bo i ett hem som styrs av automatiska processer låter ganska passivt.

Mina kollegor designforskarna Karin Ehrnberger och Loove Broms intervjuade människor i olika hushåll om deras energianvändning. Som en del i undersökningarna gick de med på en rundtur i husen för att ringa in platser förknippade med energianvändning. Det visade sig att vissa energi-platser, som exempelvis el- och vattenmätare, var väl undangömda för de flesta i hushållet. De fanns ofta i skrymslen i källare eller garage – utrymmen som traditionellt har använts mer av män än av kvinnor. När energimätare

- *Figur 2:* Bilden av det smarta hemmet stämmer ofta inte överens med den stökiga verkligheten. Hur kan tekniken utformas så att den passar även slarviga hushåll?



är placerade i dessa utrymmen är de därför inte lika tillgängliga för kvinnor och barn. Eftersom mätarna inte heller var så estetiskt tilltalande i sin utformning passade det bra att de var undangömda. Mina kollegor ställde frågan hur mätare skulle utformas för att passa bra i rum där fler personer i hushållet vistades och hur informationen skulle presenteras för att bli tillgänglig för fler.

Energy Aware Clock på sidan 125 är ett av resultaten. Den designades med avsikt att visualisera information om elanvändning på ett nytt sätt. Klock-metaforen signalerar till de boende att sätta energianvändningen i centrum, på en central och delad plats som till exempel i köket. Precis som en köksklocka som är tillgänglig och lättanvänd för alla hushållets medlemmar.

UTMANINGAR SOM FORSKNINGEN TAR SIG AN – NÄSTA STEG

En allmän utmaning i de smarta elsystemen är att hitta en bra balans mellan automatiska och användarstyrda system. Automatiska system minskar kravet på hushållen att vara aktiva, men kan också medföra svårigheter i sådana komplexa situationer som vardagen består av. Ett dilemma kan handla om att lämna över styrning av hemmets värmepump eller annan elektrisk utrustning till ett elnätsbolag. För att öka kapaciteten i elnäten under vissa tidpunkter kan bolaget "låna" av hushållets flexibilitet – då dras hushållets elanvändning automatiskt ned under tider då kapaciteten i elnäten behöver öka. En sådan styrning finns redan i industrin, men än så länge enbart i liten skala för privata hushåll. Att hushållen bidrar med el som inte behövs i bostaden till att stärka samhällets elnät, och kan använda el från förnybara energikällor är förstås bra, men det är också viktigt att förstå hur hushållen påverkas av den här typen av strategier. Här kan forskningen fylla en viktig funktion för att besvara frågor om alltifrån hur hushållen ska kompenseras för deras utlåning av flexibilitet till vad som händer med integritet och sårbarhet när någon utanför hemmet tar över styrningen av bostaden. Vilka risker uppstår när hushållen inte längre har kontroll över – och förståelse för – bostadens tekniska system? Hur påverkas

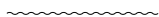


- ▲ *Figur 3:* Energy Aware Clock är utformad för att ge mer tillgänglig information om hushållets elanvändning. Design: Loove Broms och Karin Ehrnberger.

människors tillit till energisystemet, energibolag och företag som utvecklar olika energitjänster? Vi behöver också kunskap om hur medborgarna kan få en röst i utvecklingen av energisystemet, så att utvecklingen kan ta hänsyn till både miljömässiga och sociala aspekter.

SAKERNAS INTERNET

– INTERNET OF THINGS (IoT)



Carlo Fischione

Sakernas internet (eng. *the Internet of Things, IoT*) är en teknologi som gör det möjligt att koppla internet till fysiska objekt, informations- och kommunikationssystem eller till och med människokroppen.

Till exempel, låt oss ta en titt på våra framtida hem, där *sensorer* i elsystemet kan övervaka vår elkonsumtion eller hur vi använder vitvaror som kylskåp, frysar och spisar. Sensorerna kan *överföra* informationen via internet till ett övervakningscentrum, där mönster i vår elkonsumtion *analyseras*. Låt oss också föreställa oss att det någonstans på internet kommer att finnas en algoritm (artificiell intelligens) som, baserat på analyserna av data från våra hem, data från energiproducenter och priset på energi, ger oss *återkoppling* på hur vi kan använda energi på ett mer hållbart vis. Algoritmen skulle till exempel kunna berätta för oss att energin vid en viss tid på dagen kommer från hållbara källor, medan den kommer från fossila bränslen vid andra tider. Baserat på denna information kan vi bestämma oss för att förbruka mer, eller mindre, energi vid olika tider på dagen. Vi kan också föreställa oss att framtidens algoritmer kan placeras inuti själva sensorerna. Detta gör det möjligt för sensorerna att utföra avancerade beräkningar som idag kräver enorm datorkapacitet. Sensorerna kan då kommunicera med varandra över internet, liksom med enheterna som producerar energi. Tillsammans kan de fatta alla beslut som behövs för att vår energianvändning ska vara helt automatiserad. I

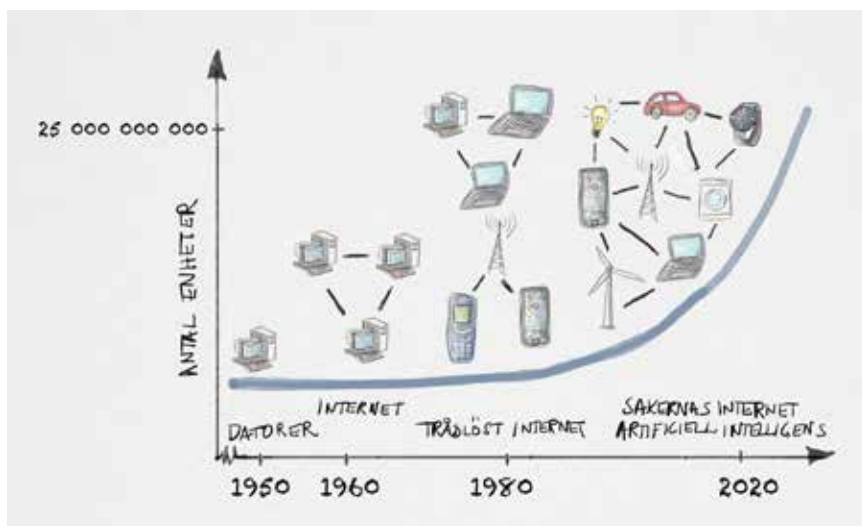


- ▲ *Figur 1:* Sakernas internet (Internet of Things, IoT) gör det möjligt att koppla samman i stort sett vilka enheter som helst. Källa: <https://www.sap.com/uk/insights/what-is-iot-internet-of-things.html>.

den här framtiden kan vi dessutom själva producera energi i våra egna hem, genom vindkraft eller solpaneler. Vi bestämmer sedan om vi vill använda denna energi själva, eller om vi vill sälja den vidare till andra.

För att allt detta ska vara möjligt behöver vi Sakernas internet som en infrastruktur för koordination, kommunikation och beslutsfattande.

Sakernas internet är en komplex teknologi som består av enheter som kan samla in data (sensorer) och kommunicera den via internet med andra enheter, liksom med olika centra för övervakning och kontroll. Det är en kombination av enheter för datainsamling, kommunikationsteknik, artificiell intelligens, och teknik som kan utföra de beslutade handlingarna (t.ex. sänka temperaturen i kylskåpet). Sett utifrån energisystemets synvinkel så är målet med



▲ *Figur 2:* Forskare tror att det kommer att finnas omkring 50 miljarder Sakernas internet-enheter i världen år 2025.

Sakernas internet att göra de övergripande systemen mer hållbara. Detta inkluderar både småskaliga system (t.ex. hemmet) och storskaliga system (t.ex. hela städer och regioner) med tusentals sensorer som täcker stora geografiska områden. Andra exempel på storskaliga system är produktion och distribution av dricksvatten, övervakning i smarta städer (av t.ex. trafik, luftföroreningar) och av jordbruk. Utöver våra hus och lägenheter innefattar småskaliga system även olika former av övervakning av människokroppen (t.ex. blodtryck, puls).

Forskare kom på den ursprungliga idén till Sakernas internet i mitten av 1990-talet. Det tog därefter mer än 20 år innan de grundläggande förutsättningarna hade studerats och idén var färdig att användas och ha en inverkan på den verkliga världen. Idag omsätter Sakernas internet tiotals miljarder kronor per år på den globala



- ▲ *Figur 3:* Vårt samhälle kommer att bli alltmer beroende av Sakernas internet-teknologin. Teknologin behöver därför vara pålitlig och säker att använda.

marknaden. En viktig komponent i framgången för Sakernas internet är den femte generationens mobilnätverk (5G). Tack vare 5G är det mycket lättare att koppla datainsamlade enheter (sensorer) till internet. Om tre år – 2025 – tror forskare att 5G kommer att ansluta tiotusentals enheter per kvadratkilometer, med totalt 50 miljarder Sakernas internet-enheter runtom i världen.

Den här utvecklingen kommer att göra oss alltmer beroende av Sakernas internet-teknologin. Många tillämpningar kommer att vara till stor nytta både för individer och för samhället i stort, men det finns även potentiellt negativa konsekvenser. Enheter som övervakar en smart stad eller en lägenhet kan följa vårt beteende och vilka val vi gör, och den insamlade informationen skulle

kunna användas för att påverka våra handlingar. Den här typen av överväganden handlar om att skydda individers privatliv. Men det finns även säkerhetsaspekter som det är viktigt att vara medveten om. Vad skulle hända om enheterna hackades av någon som sedan matade in falska data i systemet? Tänk om tekniken manipulerades så att vissa enheter verkade för att försämra vår energiförbrukning istället för att förbättra den? Det här är grundläggande frågor som vi behöver ta med i beräkningarna om vi vill göra Sakernas internet-teknologin både pålitlig och trovärdig. Idag har forskare redan utvecklat flera skyddande lösningar, men det behövs mer forskning på området. För närvarande överskuggas dock de potentiella nackdelarna med Sakernas internet fullständigt av fördelarna som det medför i våra liv.

DE INDUSTRIELLA REVOLUTIONERNA

INDUSTRI 4.0 ~ 2000

ÖRAD SAMMANKOPPLING AV ENHETER
OGH MASKINER - SÄKERHETS INTERNET
(INTERNET OF THINGS) NÄTVERK AV
SAMMANLÖDDA SYSTEM BÖRJAR ANVÄNDAS FÖR
AVANCERAT SAMARBETE MASKINER EMELLAN
(SE KAPITLET OM JÄGERNS INTERNET)



INDUSTRI 3.0 ~ 1970

DATASBERNAS INTRÄDE GÖR DET LÄTTARE
ATT AUTOMATISERA PROCESSER. MINORE
MÄNSKLIGT ARBETE KRÄVS OCH MASKINERNA
SAMARBETAR SINSEMLAN I STÖRRE UTSTÄLLNING
ÄN TIDIGARE.



INDUSTRI 2.0 ~ 1870

MASSPRODUKTION OCH LÖNNANDE BAND INTRODCERAS.
ELEKTRISK ENERGI GÖR MASKINERNA MER
EFFEKTIVA OCH KAPABLA ATT UTFÖRA
TUNGT ARBETE.



INDUSTRI 1.0 ~ 1780

MASKINER BÖRJAR ANVÄNDAS FÖR ATT UNDERLÄTTA
MÄNSKLIGT ARBETE. MASKINERNA DRIVS I FÖRSTA HAND
MED PÅTTENRÄNGA SOM SKAPAS GENOM FÖRBÄNNING.



CYBERSÄKERHET I ENERGISYSTEMET

~~~~~  
*Fredrik Heiding*

Den snabba digitaliseringen av samhällets infrastruktur som nu pågår kallas ofta den *fjärde industriella revolutionen*, eller ”Industri 4.0”. I denna tekniska revolution ökar graden av sammankoppling drastiskt; apparater som tidigare var analoga och isolerade blir digitala och uppkopplade till internet. Energisektorn är inget undantag – tvärtom är den snarare en drivande del av revolutionen. Nya trender inom energisektorn förändrar hur elektricitet produceras, distribueras och konsumeras. Traditionella *elnät* omvandlas till digitaliserade och sammanlänkade smarta elnät (eng. *smart grids*). Enskilda *hushåll* blir också uppkopplade när smarta elmätare installeras i allt fler hem. *Konsumenter* som producerar elektricitet med hjälp av småskalig vind- eller solkraft blir ”prosumenter” som bidrar till det smarta elnätet med ”hemgjord” el (läs mer i kapitlet om framtidens elkraftnät respektive smarta elnät).

Utvecklingen medför många fördelar, men också en risk: När systemen blir digitaliserade och uppkopplade blir de mer sårbara för cyberattacker. Kommunikationskanalerna i det uppkopplade energisystemet kan då användas av illvilliga aktörer för att komma åt systemet i olagliga syften. Den här typen av cyberkrigföring håller på att bli en central del av vår moderna värld,

◀ *Figur 1: De industriella revolutionerna.*

där organisationer inom energisektorn tillhör de mest attraktiva målen för angriparna.

Jag och mina kollegor intervjuade nyligen 15 tjänstepersoner som arbetar med cybersäkerhet vid olika energioorganisationer i Europa. Nästan samtliga av dessa trodde att cyberattacker mot energisektorn skulle öka under de kommande åren. Att energisektorn är en så lukrativ måltavla har lett till att regeringar runtom i världen i hemlighet spenderar ofantliga summor på att träna upp cyber-angripare. För energisektorn är det avgörande att fortlöpande förbättra sina cyber-försvar för att hålla jämna steg med de alltmer kompetenta angriparna. Ett återkommande problem är att kraftverk hanterar många apparater med operationell teknologi (OT). Sådana apparater använder en kombination av hårdvara och mjukvara för att övervaka eller kontrollera olika delar av ett industrikomplex. Det kan till exempel vara sensorer som övervakar det smarta elnätet för att hålla koll på kraftverkets elproduktion eller andra uppgifter. OT-apparatur är ofta konstruerad med tonvikt på säkerhet och tillgänglighet, så att verksamheten ska kunna drivas utan avbrott. Eftersom OT-enheter överlag är bra på att fungera på en säker nivå, kan de ha en avsevärt längre livstid än moderna system och mjukvaror. Detta blir till ett problem när OT-enheterna bygger på en gammal teknologi med dålig standard för cybersäkerhet. En del OT-enheter har en livslängd på över 20 år, och att säkerställa cybersäkerhet för en så lång tidsperiod är i det närmaste omöjligt. En annan akut fråga för energisektorn (liksom för många andra sektorer) är att anställa personal med god kompetens i cybersäkerhet. Många organisationer i energisektorn planerar att bygga ut sina avdelningar för cybersäkerhet, men att hitta nya medarbetare med rätt kunskaper är en utmaning.

Att hitta exempel på cyberattacker mot energisektorn är däremot lätt, varav vissa har lett till svåra följder. Attackerna kan ha olika syften och komma från en mängd aktörer med olika bakomliggande motiv. Vissa görs för ekonomisk vinning. Här är attacker med så kallad ransomware ("gisslanprogram") ett bra exempel, där

angriparen krypterar målföretagets enheter så att de blir oåtkomliga, och kräver betalning för att låsa upp dem igen. Det norska energiföretaget Hydro utsattes för en sådan attack 2019, som ledde till produktionsförluster och andra skador värderade till mer än 70 miljoner amerikanska dollar. Det är okänt vem angriparen var.

Andra attacker har till syfte att störa verksamheter eller destabilisera kritiska samhällsfunktioner. Ett exempel på en sådan attack är den skadliga programvaran Stuxnet, som riktades mot system på en iransk anläggning för anrikning av uran. Attacken ledde till svåra störningar i anläggningens produktion och verksamhet. Stuxnet upptäcktes 2010 och även om det finns misstankar om att USA och Israel låg bakom attacken, har inget land ännu tagit på sig skulden.

Det kan vara svårt att reda ut cyberattackernas ursprung, eftersom kunniga hackare har många sätt att dölja sina spår. De kan till exempel använda en typ av kod och attack som vanligtvis används av en annan hackergrupp. Det medför stora utmaningar för brottsutredarna eftersom det kan se ut som att en (i det här fallet) oskyldig grupp låg bakom attacken.

En annan omfattande cyberattack genomfördes med det ökända skadliga programmet BlackEnergy. Attacken genomfördes mot ett ukrainskt kärnkraftverk i april 2022 och slog ut över 30 av kraftverkets understationer. Detta ledde till att 200 000 ukrainare blev utan elektricitet i uppmot sex timmar. Programvaran användes tillsammans med så kallade phishing-mejl (förfalskad e-post som ofta innehåller länkar till skadligt innehåll). Turligt nog var kraftverket inte helt digitaliserat och hade därför ett antal manuella nödsystem som gjorde det möjligt att hålla igång verksamheten. Om kraftverket hade varit fullt digitaliserat (som många moderna kraftverk är) kunde strömavbrottet ha blivit mycket mer långvarigt. Till skillnad från Stuxnet-attacken har de skyldiga bakom BlackEnergy-attacken officiellt pekats ut som den ryska hackergruppen Sandworm, som anses vara finansierad av den ryska regeringen. Den här typen av attacker genomförs ofta av hackergrupper med stöd och sponsring från regeringsnivå.

Det finns ingen enskild lösning för energisektorns problem kring cybersäkerhet, däremot ett flertal åtgärder som kan minska risker och skadeverkningar. Angripare drar ofta nytta av olika sårbarheter i systemet som de attackerar. Sårbarheterna kan liknas vid sprickor i en mur, hemliga ingångar, eller svagheter som kan utgöra en väg in i systemet. För att säkra framtida system är det viktigt med proaktiv sårbarhetstestning (penetrationstestning) av både system och användare. Penetrationstestning innebär att man ikläder sig rollen som angripande hackare, och försöker ta sig in i systemet. Testningen innehåller ofta flera steg:

1. Spaning (eng. *reconnaissance*): samla in information om målet för attacken, till exempel läsa rapporter, öppen källkod, dokumentation och information som finns tillgänglig online.
2. Skanning (eng. *scanning*): testa systemet för att hitta potentiella vägar in som kan utnyttjas för attacken.
3. Exploatering (eng. *exploitation*): använda olika hacker-tekniker för att få fotfäste i systemet via vägarna som upptäckts under skanningsfasen.
4. Behörighetshöjning (eng. *privilege escalation*): när hackare har säkrat tillgången till en dator via en ovetande användare (t.ex. anställd på företaget) kan de höja användarens behörighet, till exempel från ett gästkonto till ett administratörskonto. Detta gör det möjligt för hackaren att komma djupare in i systemet.
5. Post-exploatering (eng. *post-exploitation*): efter att ha tagit sig in i systemet kan hackarna lämna skadlig programkod efter sig, som sedan kan kommunicera med hackarnas eget system för att ge information eller hålla vägen öppen för en ny attack vid en senare tidpunkt. Hackarna vill även sopa igen spåren efter sig.

Operationell teknologi (OT) kan inkludera komplex fysisk utrustning som är svår att simulera i testmiljö. Testning av OT skiljer sig därför något från den traditionella penetrationstestningen som beskrevs ovan. Att utföra testerna i den verkliga produktionsmiljön är oftast inte att rekommendera, eftersom det riskerar att skada verksamheten på riktigt. En möjlig lösning är att installera en testutrustning som simulerar den verkliga miljön, men eftersom maskinerna ofta är dyra och komplexa är det inte alltid genomförbart i praktiken.

Den här typen av aktiv sårbarhetstestning hjälper oss att få en bättre förståelse för de inbyggda svagheter i systemen, vilket gör oss bättre på att försvara oss. Vi vet att det idag – och under en tid framöver – finns stora mängder sårbarheter i alla möjliga produkter och system, inklusive de som används i kraftverk. Aktiv sårbarhetstestning av dessa system är ett viktigt sätt att förbättra energisektorns cybersäkerhet, så att våra tekniska framsteg kan byggas på en stabil grund.



## FÖRFATTARE

*Lina Bertling Tjernberg* är professor i elkraftnät vid KTH och föreståndare för KTH:s energiplattform. Hennes forskning fokuserar på elkraftteknik för ett uthålligt samhälle med särskilt intresse för modeller för tillförlitlighetsanalys, prediktivt underhåll och livslängdkostnader.

*Matthäus Bäßler* är docent i kemiteknik vid KTH. Hans forskning handlar om koldioxidavskiljning från industriella rökgaser för att minska utsläppen av växthusgaser och begränsa den globala uppvärmningen.

*Fredrik Brounéus* är utredare vid den ideella organisationen Vetenskap & Allmänhet. Han är apotekare, journalist och författare.

*Ann Cornell* är professor vid Institutionen för kemiteknik vid KTH. Hennes forskning handlar om elektrolysprocesser i industrin, och hur de kan göras mer effektiva och hållbara.

*Daniel Ddiba* är forskare vid Stockholm Environment Institute, och även anknuten till KTH. Hans arbete är fokuserat på hur cirkulära system för sanitet och avfall kan bidra till hållbar utveckling i snabbväxande städer.

*Christophe Duwig* är professor vid Institutionen för kemiteknik vid KTH och vice föreståndare för KTH:s energiplattform. Hans forskning handlar bland annat om hur värme och massa överförs och kan fångas upp och användas vid låga temperaturer, ren och energieffektiv inomhusmiljö, kristallisering, och minskning av föroreningar.

*Carlo Fischione* är professor i Internet of Things vid Skolan för elektroteknik och datavetenskap på KTH, avdelningen för nätverks- och systemteknik. Hans forskningsintressen ligger inom tillämpad optimering, statistik och trådlösa nätverk samt historia.

*Kerstin Forsberg* är docent i kemiteknik vid KTH. Hennes forskningsområde är industriell kristallisation. Kunskapen tillämpas ofta för att utveckla processer för utvinning av resurser från avfallsströmmar, såsom förbrukade batterier och gruvavfall.

*Francesco Fuso Nerini* är docent vid KTH:s avdelning för energisystem och föreståndare för KTH Climate Action Centre. I sin forskning tar han sig an tvärvetenskapliga frågor kring hållbar utveckling.

*Fredrik Heiding* är doktorand vid KTH. Hans forskning handlar om hur cybersäkerheten i det moderna samhället kan förbättras. Här ingår ofta arbete kring hur energisektorn och annan kritisk infrastruktur kan värnas.

*Christopher Hulme* är docent vid Institutionen för materialvetenskap vid KTH. Hans forskning handlar om tekniker för effektiv produktion och karakterisering av metallpulver. Han är även intresserad av hållbar försörjning av kritiska material.

*Per Högselius* är professor i teknikhistoria vid KTH. Han forskar om energiförsörjningens historia i svenskt, europeiskt och globalt perspektiv.

*Cecilia Katzeff* är docent i människa–datorinteraktion och fil.dr i psykologi. Hon arbetar på institutionen för hållbar utveckling, miljövetenskap och teknik vid KTH, där hon forskar på hushållens roll i övergången till ett hållbart samhälle.



*Henrik Kusar* är docent i kemiteknik vid KTH. Han forskar inom katalys och förnybara och hållbara processer av biomassa.

*Pär Olsson* är professor i fysik vid KTH. Hans forskning inom kärnenergiteknik handlar om materialutveckling inom både bränsle och strukturmateriel, samt strålskadestudier och utveckling av framtidens reaktorer.





**Energi finns överallt. Vi tar för givet att den finns tillhands när vi vill värma upp våra hem, laga mat, använda våra datorer, mobiltelefoner, rulltrappor, lyftkranar, röntgenapparater, bussar, tåg, flygplan och bilar. Den är en självklar, ofta osynlig – och tyvärr ohållbar del av våra liv.**

Idag vet vi att världens energisystem måste omvandlas i grunden. Det är en förutsättning för att vi ska kunna bromsa klimatförändringarna och skapa ett hållbart samhälle. Och vi har alla viktiga roller att spela i omvandlingen. Men hur förändrar vi något som vi inte kan se?

I den här antologin delar några av Sveriges ledande energiforskare sin syn på kända och mindre kända utmaningar och lösningar kring framtidens energi. Syftet är att stimulera samtal och konstruktiv debatt för att vi ska kunna ta oss an utmaningarna i en öppen dialog där fakta och kunskap formar vår framtid.

Boken är skriven av forskare anslutna till **KTH:s Energiplattform**, i samarbete med den ideella organisationen **Vetenskap & Allmänhet, VA**.



**Vetenskap & Allmänhet**

VA – PUBLIC & SCIENCE

