Energiteknikens grunder

Energiteknik del 1
Anders Bengtsson

18 januari 2011

Sammanfattning

Dessa anteckningar är ett komplement till häftet ”Energitekniska formler med kommentarer”. Syftet med dem är att reda ut vissa grundläggande begrepp och benämningar för att undvika missförstånd och att tanken leds fel. Det passar bra att läsa först.

1 Begrepp och språk

I energitekniken rör man sig med en lång rad av begrepp som man måste göra sig familjär med. Vissa av dem har namn eller benämningar som man troligen inte hört talas om tidigare och som inte har någon annan användning utanför energitekniken. Ett exempel är *entalpi* som vi ska lära känna så småningom. Andra begrepp har namn som vi redan känner till från vardagen, exempel är *temperatur* och *värme*. Fler sådana exempel är *kraft*, *arbete* och *energi*. Dessa begrepp, eller snarare dessa ord, använder vi till vardags för en rad mer eller mindre olika företeelser. De flesta vet nog att dessa ord har en teknisk och naturvetenskaplig betydelse, men man kanske inte är så säker på vad den innebär. Man kanske inte ens är så säker på den vardagliga betydelsen heller. Detta ger ett problem när man studerar ett tekniskt ämne som energiteknik. Man måste lära sig och förstå den tekniska betydelsen av dessa ord. Men vi är inte mer än människor, och ibland står den vardagliga betydelse i vägen och försvårar för oss att förstå genom att lura oss att tänka fel. Man måste lite grand ”avlära” de vardagliga betydelserna.

Innan vi går in på det speciellt energitekniska begreppen och deras benämningar, låt oss klara av en benämning som är vanlig i tekniska och naturvetenskapliga sammanhang. Nämligen *kropp*. Man talar ofta om en ”kropp” eller flera ”kroppar”. Här menar man inte en människokropp. Man behöver ett bekvämt ord för att beteckna ett föremål vilket som helst som deltar i något tekniskt sammanhang, det kan vara ett stålbalk, vattnet i en behållare, en järnvägsvagn, en kärnbränslestav, gasen i en gastub, gastuben själv, ett strykjärn, motorn i en elvisp, ja precis vad som helst. Men man använder ordet kropp för att få sagt att det man vill säga gäller oberoende av föremålets egenskaper på detaljnivå.

Själv tycker jag begreppet ”kropp” låter lite trägit, man tänker på dammiga fysiksalar från 60-talet och glåmiga lärare som inte sett ljuset på många år. Jag lättar alltså upp texten med att växla mellan ”kropp” och ”föremål”. När man säger en ”kropp” så menar man i allmänhet ett enkelt föremål såsom ett stycke metall.

1.1 Värme och temperatur

”Det är varmt” säger vi när temperaturen är hög. ”Det är kallt” säger vi när temperaturen är låg, men vi säger inte att värmen är låg eller hög. Så värme och temperatur kan inte vara riktigt samma sak, men de hänger samman. Sanningen är att värme och temperatur är två helt skilda begrepp, men de är nära relaterade. Värme är en energiform, men det säger inte så mycket eftersom vi inte sagt vad energi är. Låt oss ändå använda begreppet energi även om vi ännu inte diskuterat vad det är, det kommer senare.

Vi börjar med en vardaglig bild. En kastrull med kallt vatten ställs på en varm spisplatta. Vi utgår från vår vardagsförståelse att vattnet i kastrullen har låg temperatur medan spisplattan har hög temperatur. Vi vet att vattnet kommer att ”värmas upp” som vi säger. Vattnets temperatur kommer att stiga. Vi vet att det är förknippat med en överföring av energi från spisplattan till kastrullen och vattnet. Denna överförda energi kallar vi just *värme*. Om värmen, eller snarare om sambandet mellan värme och temperatur kan vi säga:

- ”Värme är en överföring av energi från ett föremål till ett annat som följd av en skillnad i temperatur.”
- ”Värme flödar alltid från det varmare föremålet till det kallare.”

Med ”kallare” menar vi den lägre temperaturen. Med ”varmare” menar vi den högre temperaturen. Vi förstår också att om det inte finns någon skillnad i temperatur, då sker heller ingen värmeöverföring.

Mätning och enheter för temperatur

Temperatur mäts med termometrar! Men vad är en termometer? Och hur definieras egentligen temperatur? Det är en lång historia som vi inte tar nu. Låt oss nöja oss med att vad vi redan vet. Temperatur mäts med termometrar.

Till vardags använder vi Celsiusskalan. 0 grader Celsius definieras som temperaturen vid vattnets fryspunkt (vatten i jämvikt med is vid normalt atmosfärstryck). 100 grader Celsius definieras som temperaturen vid vattnets kokpunkt (vatten i jämvikt med ånga vid normalt atmosfärstryck)[1].

I värmetekniska och naturvetenskapliga sammanhang använder vi ofta Kelvinskalan. Kelvinskalan bygger på att det finns en lägsta temperatur, nämligen $-273,15\,°\mathrm{C}$. $0°$ C är samma som $273,15$ K. Lägg märke till att man inte använder gradbeteckning ° för Kelvin.

Omvandling från Celsius till Kelvin innebär helt enkelt att man lägger $273,15$ till temperaturen i Celsius och byter enhet från °C till

[1] Vad som menas med jämvikt kommer senare i avsnitt 2.5.

K. I värmetekniken klarar man sig med lägre noggrannhet och man lägger till 273 K. Omvandling åt andra hållet, från Kelvin till Celsius gör man genom att subtrahera 273 K och byta enhet från K till °C. Detta kommer vi att göra många gånger i kursen.

Om vi har en viss temperatur T så blir alltså omvandlingen mellan enheterna

$$T\,\mathrm{K} = (T - 273,15)\,^{\circ}\mathrm{C} \tag{1}$$

$$T\,^{\circ}\mathrm{C} = (T + 273,15)\,\mathrm{K}. \tag{2}$$

Exempelvis är $100\,^{\circ}\mathrm{C} \approx 373\,\mathrm{K}$.

Själva temperatursteget mellan graderna är lika stort som i Celsiusskalan. Det betyder att en skillnad i temperatur, exempelvis en höjning av temperaturen med 50 grader får samma värde i de båda skalorna. Man kan därför skriva exempelvis: ”höjning av temperaturen” $= 50\,^{\circ}\mathrm{C} = 50\,\mathrm{K}$. Men detta gäller enbart om det är en *skillnad i* eller *förändring av* temperatur man avser. Temperaturens värde skiljer sig med $273,15$ grader i de båda skalorna. Säkrast är att alltid räkna med Kelvin i dessa sammanhang. Allra bäst är givetvis att veta vad man gör och vara noggrann med hur man uttrycker sig!

Mätning av värme

Nå, vad mäter man då värme i?

Den moderna enheten för värme är Joule, förkortat J. Detta är samma enhet som man mäter energi i. Som sagt, värme är en form av energi, eller för att vara noggrann, värme är en form av energiöverföring, eller förändring i energi. Med detta menar vi att, och det ska vi tala om mycket, att en kropp inte kan ha ett visst värme. Värme kan inte lagras. Värme kan enbart flöda från en kropp till en annan.

Kan då inte energi lagras? Jo, energi kan lagras, men då talar man inte om värme, utan om ”inre energi”.

Vi nöjer oss med dessa ord om energi just nu. Nu ska vi först bekanta oss med några begrepp och symboler som vi kommer att använda i hela kursen.

1.2 Förändringar och Δ-symbolen

I värmetekniken såväl som i andra tekniska sammanhang räknar vi på olika typer av processer där systemen genomgår förändringar och därmed ändras deras egenskaper och därmed de storheter som beskriver deras egenskaper. I en process ändras systemets egenskaper och därmed ändras dess tillståndsvariabler (det vill säga just de storheter som beskriver det)[2]. Vi behöver ett matematiskt sätt att beteckna sådana förändringar.

Säg att vi har en storhet S som ändras från värdet S_1 till värdet S_2 när ett system genomgår en process från tillståndet 1 till tillståndet 2. Ändringen i S betecknas då med delta-symbolen Δ och vi skriver ΔS för att beteckna förändringen och vi räknar ut den som

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

Här finns en del att reda ut.

Vad i hela friden betyder siffrorna 1 och 2 som dekorerar storheten S? Jo, det är just en dekoration som är till för att skilja på storhetens värde i två olika tillstånd. Det är ibland praktiskt att ”numrera” tillstånd för ett energitekniskt system och då använder man siffror som man ”hänger på” beteckningen för storheten ”nere till höger”. Ibland använder man istället ord som ”in” och ”ut” och då hänger man på dem istället. Då ser det ut såhär: S_{in} och S_{ut}. Exempel på det kommer så småningom.

En förändring kan vara antingen en ökning eller en minskning. Antag att systemet går från tillstånd 1 till tillstånd 2:

- Om $S_2 > S_1$ så ökar S och vi får $\Delta S > 0$
- Om $S_2 < S_1$ så minskar S och vi får $\Delta S < 0$

Helt enkelt mycket praktiskt och detta kommer vi att använda oss av hela tiden. Exempelvis den temperaturhöjning på 50 grader som vi hade ovan kan nu skrivas som $\Delta T = 50\,^\circ\mathrm{C} = 50\,\mathrm{K}$.

1.3 Små och stora förändringar

Ofta har man anledning att räkna på små förändringar.

När vi använder Δ har vi inte gjort någon inskränkning i hur små eller stora förändringar vi räknar på. När man vill ange att en

[2] Vi ska diskutera ”system” och ”processer” mer utförligt längre fram i avsnitt 2.1.

förändring är speciellt liten (i någon mening som vi ska tala om mer senare) så skriver ofta istället symbolen δ. En liten förändring i storheten S skrivs alltså δS.

Vad är då en liten förändring? Ja, det är en fråga som får besvaras från fall till fall, det beror på omständigheterna. Oftast menar man en relativt liten förändring. Säg att man har en cylinder vars längd x från topp till kolv är 5 cm. Antag att kolven rör sig 1 mm. Då kan man säga att förändringen i x är liten och man kan skriva att $\delta x = 1$ mm. Men det är inte på detta sätt som man egentligen använder symbolen för små förändringar. Även här skulle man lika gärna kunna skriva $\Delta x = 1$ mm.

Nej, små förändringar räknar man snarare med i mer teoretiska sammanhang när man vill räkna en förändring i förhållande till en annan som exempelvis när man vill räkna ut en hastighet. Antag till exempel att kolvrörelsen på 1 mm sker under en tid $0,01$ s. Då skulle man kunna säga att förändringen i tid är just $\delta t = 0,01$ s. Kolvhastigheten kan då räknas ut som

$$\frac{\delta x}{\delta t} = \frac{0,001\,\mathrm{m}}{0,01\mathrm{s}} = 10\,\mathrm{m/s}$$

Nåväl, det här ser ju misstänkt ut som en derivata från matematiken, och det är det också. En sådan här kvot mellan två differenser kallas för en differenskvot både då man räknar med Δ och δ. I praktiken använder man oftast enbart Δ men det kan ibland vara bra att använda δ om man vill förtydliga att man speciellt tänker sig små förändringar.

Om alltså x är läget för en kropp så kan hastigheten beräknas approximativt som differenskvoten.

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Om man räknar med allt mindre Δx och Δt så får man noggrannare värde för hastigheten. Till övergår differenskvoten i en derivata

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \rightarrow \frac{dx}{dt}$$

1.4 Arbete och kraft

För att skapa sig en bild av begreppet arbete måste man först förstå begreppet kraft. Kraft är ett begrepp som kommer från mekaniken, läran om hur och varför kroppar rör sig. Man skulle kanske kunna tro att kraft är ett begrepp som har en klar och tydlig definition. Så är det märkligt nog inte. Begreppet kraft definieras indirekt via vilka egenskaper det har. Nu är detta inte en kurs i mekanik, så vi nöjer oss med enbart en del av historien.

Kraft

Kraft är något som kan bidra till att förändra hastigheten hos en kropp, alltså något som ger upphov till acceleration. Sambandet mellan kraft och acceleration ges av Newtons andra lag

$$ma = F$$

Massan gånger accelerationen är lika med kraften (eller snarare summan av alla krafter) som verkar på kroppen.

Sedan kan man skriva ned en lista på krafter: tyngdkraft, kraft i en fjäder, friktionskraft, luftmotståndskraft, elektrisk kraft, magnetisk kraft, et cetera. Allt som kan sättas in i Newtons andra lag är exempel på krafter.

Mätning av kraft

Ett enkelt sätt att mäta kraft är att använda en dynamometer. En sådan består i princip av en fjäder och en skala. Den bygger på att kraften i fjädern är proportionell mot fjäderns förlängning. Om fjäderns förlängningen betecknas med x så har man därför sambandet

$$F = k \cdot x$$

där k är *fjäderkonstanten*. Olika fjädrar har förstås olika värden på fjäderkonstanten.

När man mäter kraft med en dynamometer så är det egentligen fjäderns förlängning man mäter, det vill säga man mäter en sträcka med en linjal. Men istället för att gradera skalan i meter graderar man den direkt i enheten för kraft N (Newton).

Hur vet man då att det är kraft man mäter med en fjäder? Svaret är att om drar exempelvis en vagn som rullar bra (mycket låg friktion) med hjälp av en fjäder vars förlängning har ett visst konstant värde, så får man en konstant acceleration. Det vill säga, Newtons andra lag gäller.

Det finns många olika typer av krafter. Alla måste de mätas i samma enhet. Enheten för kraft bestäms i själva verket av just Newtons andra lag som är en lag som gäller alla krafter oberoende av deras ursprung och natur[3].

Massa mäter vi i kg (kilogram). Acceleration mäter vi i m/s^2. Massa gånger acceleration (som vi har i Newtons andra lag) mäter vi alltså i enheten kgm/s^2. Man säger "kilogrammeter per sekundkvadrat". Detta är ofta lite klumpigt, och eftersom kraft är ett så viktigt begrepp har det fått en egen enhet som kallas just Newton, förkortat N. Vi har alltså

$$1\,\mathrm{N} = 1\,\mathrm{kgm/s^2}$$

Arbete

Från mekaniken minns nog de flesta att arbete definieras som kraft gånger sträcka. Men vad menar man egentligen med detta och varför är det så?

Låt oss börja med vad man menar. Vi tänker oss en kropp som påverkas av ett antal krafter. Vi adderar dessa krafter och får den resulterande totalkraften som verkar på kroppen. Eller ännu enklare, vi tänker oss att det bara är en enda kraft som verkar på kroppen.

Vi antar nu att kraften är F. Vi tänker oss sedan att kroppen rör sig under inverkan av denna kraft. Antag att kraften är konstant, det vill säga dess värde ändras inte under rörelsen. Nu vet vi ju från Newtons andra lag att kroppen kommer att accelereras vilket innebär att den kommer att röra sig fortare och fortare. Det är dock inte det vi fokuserar på just nu. Istället fäster vi vår uppmärksamhet på det faktum att efter en viss tid så har kroppen rört sig en viss sträcka som vi kan kalla för Δs och benämner *förflyttningen.* För att vara väldigt tydliga, låt oss anta att kroppen startar i punkten s_1 och efter en viss tid är i punkten s_2. Då är $\Delta s = s_2 - s_1$.

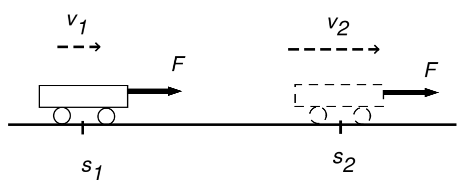
Otaliga experiment uträttade under seklens gång har visat att det är förnuftigt att definiera det av *uträttade arbetet* såsom

$$\Delta W = F \cdot \Delta s$$

alltså som "kraften gånger förflyttningen".[4]

[3] Newtons tredje lag gäller också för alla krafter.

[4] Ibland ser man den här formeln utan delta framför W, dvs man skriver $W = F \cdot \Delta s$,



Figur 1: Vagn som drages med kraften F.

Lägg dock märke till att denna definition gäller om kraften har ett konstant värde under förflyttningen. Om kraften inte är konstant, vad gör man då?

Jo man tänker sig då att under i vart fall en "liten" förflyttning ds så "hinner" kraften inte ändras så mycket, så i vart fall under denna lilla förflyttning så gäller (ungefär, dvs med ett litet fel) att $\delta W = F \cdot \delta s$ där vi i konsekvensens namn måste tänka oss att det uträttade arbetet är "litet" därav beteckningen δW.

Sedan utnyttjar man **Naturvetenskapens Kardinalregel**:

Fråga: Vad gör man om något inte är konstant?
Svar: Dela upp i smådelar och antingen derivera eller integrera!

I detta fall ska man *integera*, det vill säga summera upp alla de små bidragen till det totala arbetet. Genom att låta δ bli mindre och mindre övergår summan i en integral

$$W = \sum \delta W \to \int dW = \int F ds$$

På detta sätt kan man använda formeln som en minnesregel, men för att kunna räkna med den måste man vara mer utförlig. Vi tänker oss att arbetet uträttas under en förflyttning från en punkt (nr 1) till en annan (nr 2). För att beteckna det skriver vi

$$W_{1\to 2} = \int_1^2 dW = \int_{s_1}^{s_2} F ds$$

mellanledet är här heller ingen riktig matematisk formel utan enbart en minnesregel. Det som kan räknas ut är

och ibland ser man till och med $W = F \cdot s$. Det är svårt att vara konsekvent, och ibland styr omständigheterna in mot ett visst sätt att skriva. Man kommer inte ifrån att man måste förstå sammanhanget och inte hänga upp sig alltför mycket på hur formler ser ut ned i minsta detalj. Vårt sätt att skriva $\Delta W = F \cdot \Delta s$ är dock det mest konsekventa.

$$\int_{s_1}^{s_2} F ds$$

Detta förutsätter att man vet hur kraften F beror på sträckan s. Man måste ha funktionen $F(s)$ given för att kunna räkna ut integralen och därmed arbetet.

Det enklaste fallet är då kraften faktiskt är konstant: $F(s) = F$. Då får man följande kalkyl

$$\int_{s_1}^{s_2} F(s) ds = \int_{s_1}^{s_2} F ds = F \int_{s_1}^{s_2} ds = F \cdot [s]_{s_1}^{s_2} = F(s_2 - s_1) = F\Delta s$$

Man ser hur det hela hänger ihop. I fallet med en konstant kraft får man tillbaka den formel vi hade tidigare.

Då vet vi hur man definierar och räknar ut arbete, men hur vet vi att arbete ska mätas i samma enhet som energi? Svaret ligger i begreppet rörelseenergi. Vi tar det i nästa avsnitt.

1.5 Energi

Man skulle kunna tro att ett så centralt begrepp som energi har en klar och tydlig definition. Det har det inte. Slår man upp böcker i energiteknik och letar efter en definition på energi så letar man förgäves. Vad man kan hitta är definitioner på olika typer av energi såsom kinetisk energi, potentiell energi, elektrisk energi och så vidare. Man hittar också resonemang om vilka egenskaper som kännetecknar energi.

Detta är kanske inte så konstigt. Naturvetenskapens utveckling har lärt oss att det finns en storhet i naturen som vi kan kalla energi och som uppträder i olika former och som uppfyller ett antal olika samband, det viktigaste den så kallade *energiprincipen*, eller *termodynamikens första lag*, som den också kallas.

Rörelseenergi

Låt oss börja med rörelseenergi, eller *kinetisk energi* som det också heter. Vi återvänder till modellen av en vagn som är dragen av en kraft F. I figuren har vi dessutom ritat ut vagnens fart i de båda lägena s_1 och s_2. Vi antar att farten är v_1 respektive v_2. Rörelsenergin K för en kropp med massan m som rör sig med farten v är

$$K = \frac{mv^2}{2}$$

När man drar vagnen med den konstanta kraften F kommer dess fart alltså att öka (eftersom den accelererar) från v_1 till v_2 och därmed får man en ökning i den kinetiska energin.

$$\Delta K = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

Om man mäter noga så visar det sig att denna ökning i kinetisk energi är precis lika med kraftens uträttade arbete.

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = F(s_2 - s_1)$$

Här har vi alltså en koppling mellan arbete och energi. Här kommer en annan.

Lägesenergi

Vi tänker oss en kran som lyfter en last med massan m från en höjd h_1 till en högre höjd h_2. Den minsta kraft som behövs för det är lika stor som tyngdkraften men med motsatt rikting, det vill säga uppåt. Om man lyfter med en sådan kraft kommer kroppen inte att accelerera utan lyftas upp lugnt och fint. Egentligen behövs det en större kraft för att motverka friktionskrafter, men för enkelhets skull räknar vi med en kraft som enbart balanserar tyngdkraften.

Det arbete som då kommer att uträttas blir

$$mg(h_2 - h_1) = mgh_2 - mgh_1$$

Om vi definierar lägesenergin i tyngdkraftfältet på höjden h över marken som

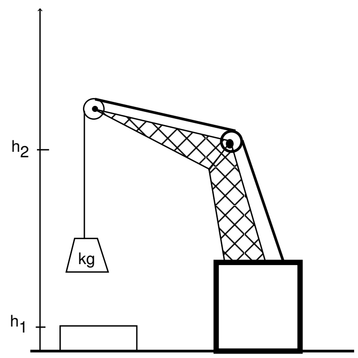
$$V = mgh$$

så motsvarar det uträttade arbetet precis en ökning i lägesenergi

$$\Delta V = mgh_2 - mgh_1$$

Kemisk energi

Med kemisk energi menar man energi upplagrad i kemiska bindningar i kemiska föreningar. I energitekniken tänker man väl först på olika former av bränsle såsom exempelvis etanol som är en förening av kol, väte och syre. De kemiska bindningarna består av elektromagnetiska



Figur 2: Lyftkran F.

krafter så kemisk energi är egentligen en form av elektromagnetisk energi. Förbränning är en kemisk process där delar av denna energi frigörs under i allmänhet en kraftig temperaturhöjning. Den så frigjorda energi är just värme.

1.6 Fysikaliska storheter, deras beteckningar, mätetal och enheter

Låt oss också reda ut en liten detalj som är bra att ha koll på i alla naturvetenskapliga och tekniska sammanhang. Vi kommer strax att tala om energitekniska system och deras egenskaper. Egenskaperna beskrivs av olika variabler, eller tillståndsvariabler som man ofta säger i detta sammanhang. Det kan vara exempelvis temperatur. En annan benämning på sådana egenskaper hos tekniska system är *storheter*. Med en (fysikalisk) storhet menar man någon egenskap som beskrivs matematiskt av en variabel. Tag just temperatur som exempel. Storheten består av tre komponenter.

(1) Den första är *symbolen* eller *beteckningen* vi använder för att beteckna den matematiska variabeln. För temperatur är det ofta bokstaven T. Ofta behöver man skilja på olika temperaturer. Det gör man genom att dekorera symbolen med index. Har man två temperaturer kan man kalla dem för exempelvis T_1 och T_2, eller kanske T_{kall} och T_{varm}.

(2) Den andra komponenten är *mätetalet*. Detta är just ett tal, det vill säga ett numeriskt uttryck som anger värdet på temperaturen,

exempelvis $37,5$. Men $37,5$ vadå? Man måste tala om i vilken sort, skala eller enhet man mäter i annars kan man inte tolka mätetalet. Det har ju betydelse om man skriver 12 meter eller 12 kilometer för att ta ett annat exempel.

(3) Den tredje komponenten är alltså just *enheten*. För vårt exempel temperatur är enheten Kelvin, förkortat K.

Ett korrekt sätt att ange en temperatur är alltså

$$T = 37,5\,\mathrm{K}$$

Vi använder SI-systemet som är ett internationellt överenskommet system för att dels ange enheter för olika naturvetenskapliga och tekniska storheter, dels för att definiera mätskalorna.

Några fler enheter

Kraft mäts i Newton (N) som vi redan sett.

Energi mäts i Joule (J) som vi också redan sett. Men det finns en koppling mellan enheterna Newton och Joule. Eftersom arbete beräknas som ”kraft gånger sträcka” så blir enheten för arbete egentligen Nm (Newtonmeter). Men arbete är ekvivalent med energi och kan alltså mätas med Joule. Därför har vi sambandet

$$1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{Nm}$$

När vi ändå håller på kan vi ta upp begreppet *effekt*. Effekt är energiutbyte per tidsenhet. För exempelvis lampor, elradiatorer, spisar och andra elektriska apparater så anger man deras effekt, hur mycket elektrisk energi de omsätter per sekund. En vattenkokare kan ha effekten 1000 J/s (Joule per sekund). Effekt är en så vanlig och viktig storhet att den fått en egen måttenhet nämligen Watt (W). Det gäller då att

$$1\,\mathrm{W} = 1\,\mathrm{J/s}$$

En glödlampa kan ha effekten 60 W. En kärnreaktor kan ha effekten 400 MW där M (mega) står för tiopotensen 10^6.

2 Mer om värmetekniska system

I ”Energitekniska formler med kommentarer” talas om *system*. Här kommer utförligare förklaringar.

2.1 System och systemgränser

Vi har redan kommit i kontakt med begreppet ”system”. Nu är det dags att utreda det i mer detalj.

Ett system, exempelvis ett värmetekniskt eller termodynamiskt, är en väl avgränsad del av verkligheten med en väldefinierad gräns (systemgränsen) mot resten av verkligheten. Resten av verkligheten, eller det som är utanför systemet, kallas för omgivningen. Att definiera system och deras avgränsningar är något vi gör som naturvetare och tekniker. Ett system kan vara nästan vad som helst. Ett exempel från biologin är ett ekosystem såsom exempelvis en sjö. För att studera livet i en sjö måste biologen göra en avgränsning mot sjöns omgivning. Hur långt upp på stranden ska man ta med, precis vid vattenbrynet eller kanske tio meter upp på stranden? Hur mycket av luftrummet ovanför sjön ska tas med? Vattenlevande djur stannar ju i vattnet, men landlevande djur kan ju röra sig in och ut ur systemet. Insekter landar på ytan men kan sedan ge sig iväg ut ur systemet.

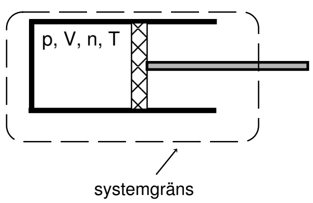
Ett annat exempel på ett system kan var ett helt kraftverk såsom exempelvis Ringhals kärnkraftverk. Återigen måste man dra en systemgräns. Systemgränsen är på ett sätt en rent geografisk avgränsning: Vad är innanför, vad är utanför? Över systemgränsen ”kommunicerar” systemet med omgivningen. Kärnbränsle transporteras in, elektrisk energi levereras ut via kraftledningarna, kärnavfall transporteras ut. Kylvatten tas in från havet och lämnas tillbaka något varmare. Anställda rör sig in och ut. Telekommunikationer, alltså rent informationsutbyte, sker med omgivningen.

Ett system kan alltså vara stort och komplext och innehålla många komponenter. Men ett system kan också vara litet såsom exempelvis en pump i ett kraftverk, eller cylinder-kolv systemet i en förbränningsmotor. I kursen kommer vi ofta att diskutera och räkna på ganska enkla system. Vi gör det eftersom vi håller på att lära oss och för att de enkla systemen är komponenter i de större mer komplicerade. För att förstå helheten måste vi förstå delarna. Det räcker dock inte, vi måste också förstå hur delarna samverkar. Vi analyserar komplicerade system i dess delar. Vi bygger stora system ur mindre delar.

2.2 Modeller av system

Rent praktiskt kan man aldrig studera ett verkligt system i hela dess komplexitet. Man måste alltid göra förenklingar. Vilka egenskaper hos systemet är viktiga? Vilka variabler beskriver dessa egenskaper? Hur är dessa variabler sammankopplade? Man måste bortse från en hel del saker, man måste försumma vissa variabler. När man gör detta talar man ibland om att man egentligen ställer upp en *modell* för systemet. Modellen är i naturvetenskapliga och tekniska sammanhang nästan alltid matematisk till sin natur. Egenskaper beskrivs just av variabler och funktioner mellan variabler.

Låt oss vara lite mer konkreta och tänka på energitekniska system. Ett exempel kan vara en gas i en cylinder med en kolv, alltså en enkel model av ett cylinder-kolv system i en förbränningsmotor.



Figur 3: Model av kolv& cylinder-system.

Här kan vi dra systemgränsen precis utanför cylindern/kolven. Då kommer kolvstången att "sticka ut" ur systemgränsen, men det är ok. Vi inser att via kolvstången "kommunicerar" systemet med omgivningen. Vi ska senare se att det är *arbete* (som är en energiform) som "kommuniceras" till omgivningen. Egenskaperna hos gasen beskrivs med variabler såsom volym V, tryck p, temperatur T och antal molekyler n. Allt detta kommer att diskuteras mer i detalj senare i kursen.

För att det ska bli intressant och användbart måste man även ha samband mellan variablerna. I detta fall har vi *gaslagen* som kopplar ihop dessa variabler (eller "storheter" som man också säger). Gaslagen säger att

$$pV = nRT$$

där R är en konstant som är densamma för alla gaser.

Förutom utbytet av energi med omgivningen via kolvstången (arbete) kommunicerar detta system även via utbyte av en annan energiform, nämligen *värme*.

Gå tillbaka och läs om detta avsnitt. Jag har talat om system. Egentligen borde jag ha skrivit "modell", ty detta är givetvis en starkt förenklad modell av ett verkligt cylinder/kolvsystem. Vi har en starkt förenklad matematisk modell av ett verkligt system. Men modellen kan göras mer komplex och ta in fler egenskaper hos det verkliga systemet, något som man givetvis gör i exempelvis de delar av fordonsindustrin som konstruerar och bygger riktiga förbränningsmotorer.

I praktiken upprätthåller man oftast inte distinktionen mellan verkligt system och teoretisk modell, utan man säger ofta bara ”system” när man kanske egentligen menar ”modell”. Men det är bra att ha distinktionen klar för sig och bära med sig den i bakhuvudet, så att säga.

Det finns en situation som denna distinktion blir extra viktig. Det är när man designar nya system. Om man vill bygga en apparat av något slag som inte redan finns, kanske en ny typ av maskin, så finns den ju till att börja med enbart som en idé. Man börjar med modellen, systemet finns inte! Allt eftersom konstruktionsprocessen går fram blir modellen allt mer utarbetad, man gör ritningar, man bygger prototyper, man bygger delarna, man sätter samman dem, man provkör, och förhoppningsvis finns modellen till sist som ett verkligt fysiskt existerande system.[5]

2.3 Slutna och öppna system

Det är viktigt att skilja mellan slutna och öppna system. Generellt sett kan ju ett system ha många olika typer av utbyte med omgivningen, energi, materia, information, människor, et cetera beroende på vad man studerar. I energiteknik inskränker man sig till utbyte av energi (värme, mekaniskt arbete, elektrisk energi) och materia.

System som enbart utbyter energi med omgivningen kallas *slutna* system. System som dessutom utbyter materia kallas *öppna* system. I praktiken är många intressanta system öppna, exempel kan vara förbränningsmotorer. En sådan motor tar in materia i form av en bränsle/luft-blandning och lämnar från sig materia i form av avgaser. Det måste man räkna på om man vill ha en noggrann modell av ett sådant system. Men i detta fall är det faktiskt möjligt att räkna på en förenklad sluten modell där man ersätter luft/bränsle blandningen in med den värmemängd som frigörs vid förbränningen, och avgaserna ut med den värmemängd som släpps ut i omgivningen.

[5] I allmänhet får sådana system dessutom egenskaper som man från början inte räknat med. De kan också fungera på sätt man inte förutsett.

2.4 Isolerade system

Med ett isolerat system menar man ett system som varken utbyter materia eller energi med omgivningen. Detta är en teoretisk konstruktion som är i princip omöjlig att uppnå eftersom det alltid sker någon form av energiutbyte med omgivningen.

2.5 Jämvikt, tillstånd och tillståndsvariabler

Jämvikt är ett viktigt begrepp inom energitekniken. Låt oss ta exemplet med att värma vatten igen. Antag att spisplattan är het men avstängd. Kanske vill man ta tillvara den *inre energin* i plattan genom att ställa en kastrull med kallt vatten på den. Detta system, bestående av spisplatta, kastrull och vatten, är till att börja med inte i jämvikt. Temperaturen är olika i olika delar av systemet. Värme kommer att strömma från plattan till kastrullen. Dock, efter en stund har temperaturen utjämnats, spisplattan har svalnat och kastrullen och vattnet har värmts upp något. Dessutom har en del energi läckt ut till den omgivande luften och resten av spisen. Men vi har uppnått temperaturjämvikt mellan spisplattan och kastrullen med vattnet. Däremot råder inte jämvikt med den omgivande luften som ju är svalare. Både spisplatta och kastrull med vatten kommer därför att svalna tills de har samma temperatur som den omgivande luften.

När ett system befinner sig i jämvikt är det meningsfullt att tala om dess *tillstånd*. De variabler som beskriver systemet har då bestämda och väldefinierade värden och man talar om *tillståndsvariabler*. Ett vanligt exempel är gasen i en cylinder, tillståndsvariablerna är förstås tryck, temperatur, volym och antal molekyler.

Alltså, när vi talar om tillstånd för ett termodynamiskt system så menar vi i allmänhet ett system i jämvikt, eller termisk jämvikt som man ibland säger. Då vet man att alla tillståndsvariabler har konstanta och utjämnade värden i hela systemet. Ty om temperaturen är olika i olika delar av ett system, vilken temperatur har det då? Vill man studera en sådan situation så får man dela upp (eller tänka sig att man delar upp) systemet i delar som har var sin konstanta och utjämnade temperatur. Sedan har man att studera utjämningsprocesser där de olika delarna utbyter värme tills de kommer i jämvikt med varandra.

2.6 Reservoarer

Systemet har ju en omgivning. En speciellt typ av omgivning har fått eget namn, nämligen *reservoar* eller *temperaturreservoar*. Med det menar man en stor omgivning som står i mycket god termisk kontakt med systemet (så att värmeöverföringen är god) och som har så stor värmekapacitet att det inte alls kommer att värmas upp när värme överförs från systemet (eller kylas när värme förs över till systemet). Reservoarens temperatur är alltså konstant.

2.7 Termodynamiska processer

Med en termodynamisk process menar man en förändring av systemets tillstånd. Man tänker sig en förändring från ett jämviktstillstånd till ett annat. Detta är viktigt, systemet går från ett jämviktstillstånd till ett annat. Då vet vi att tillståndsvariablerna har väldefinierade värde i starttillståndet och stopptillståndet, exempelvis T_{start} och T_{stopp}.

Vad som händer mellan dessa två tillstånd är däremot en annan fråga. I allmänhet får man räkna med att själva processen försätter systemet ur jämvikt. Det kan man förstå. När man hettar upp vatten i en vattenkokare kommer med all säkerhet vattnet att ha olika temperaturer i kärlet under uppvärmningen. Under processens gång är det alltså inte troligt att systemet har ett väldefinierat tillstånd i termodynamiskt mening. Det är först när vattnet kokar som temperaturen är konstant 100 grader. Detta ställer ofta till problem när man ska räkna. Ofta får man nöja sig med att räkna på start- och stopptillstånd och ”differensen” mellan dem. Men mycket kan bli uträttat ändå som vi ska se.

Reversibla och irreversibla processer

Med en reversibel process menar man en process där man kan, i vart fall i princip, ”backa” processen tillbaka från stopptillståndet till starttillståndet. Inte nog med det, omgivningen ska också kunna backas. De flesta känner nog på sig att detta är en idealisering som inte kan genomföras i verkligheten. Det är rätt, alla verkliga processer är irreversibla, de kan inte backas tillbaka. Detta är en fundamental egenskap hos naturen.

För att en process skulle kunna vara reversibel så skulle det krävas att varje mellanliggande tillstånd även det var ett jämviktstillstånd och detta är i princip omöjligt. Varför det? Tyvärr är det en lång historia som vi inte ska berätta här.

Allt är inte förlorat dock. I många sammanhang kan man ungefärligt "backa" processer reversibelt "med små avvikelser från jämvikt" så att säga, bara man tar det lugnt och fint.

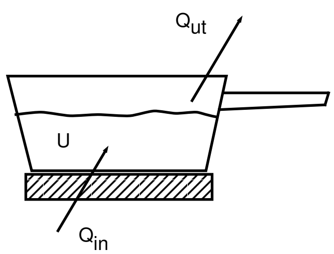
Dessutom, om man inte bryr sig om omgivningen kan man komma tillbaka till starttillståndet. Koka upp vatten i ett slutet kärl och låt det sedan svalna igen. Under dessa processer "fram och tillbaka" har systemet varit ur jämvikt och båda processerna är irreversibla, men man kommer tillbaka till samma starttillstånd för systemet. Dock, omgivningen kommer inte tillbaka till sitt ursprungliga tillstånd. Varför det? Återigen en lång historia.

Allt detta hänger samman med *termodynamikens andra lag* som vi ska diskutera senare i kursen.

2.8 Ett första mycket enkelt exempel

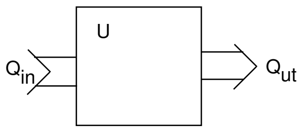
Dags för den första beräkningen!

Som ett första enkelt exempel ska vi studera ett system som enbart utbyter värme med omgivningen. Man kan tänka på en uppvärmningsprocess där en viss värmemängd tillförs ett system. Ännu mer konkret kan man tänka på uppvärmning av vatten i kastrull på en spis eller en vattenkokare.



Figur 4: Uppvärmning av vatten.

Systemet kommer då att lagra en del av detta värme i form av inre energi och därmed få en högre temperatur. Men en del av det tillförda värmet kommer att läcka ut i form av förluster. Man kan rita följande mer schematiska modell för systemet och denna process (se figur).



Figur 5: System som enbart utbyter värme med omgivningen.

Vi betecknar det tillförda värmet med Q_{in}, det bortförda värmet (förlusterna) med Q_{ut} och ändringen i inre energi med ΔU. Energiprincipen, att energi inte kan skapas eller förintas utan enbart omvandlas, ger oss nu att ändringen i den inre energin måste vara lika med skillnaden mellan tillfört och bortfört värme. Formeln blir

$$\Delta U = Q_{ut} - Q_{in}$$

För enkla system såsom en volym med vatten är ändringen i inre energi ΔU proportionell mot en ändring i temperatur ΔT.

$$\Delta U = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Detta är en experimentellt fastställd formel. I denna formel står c för den *specifika värmekapaciteten*, förmågan att lagra energi (det borde alltså heta specifik energikapacitet), och mäts i J/kgK. m är massan i kg.

Skulle man räkna noga på uppvärmning av vatten i en kastrull så skulle man också behöva ta med i beräkningen uppvärmningen av själva kastrullen.

Här är ett räkneexempel där vi gör ett uppvärmningsexperiment med en vattenkokare. Den består av en plastbehållare med en tunn kokplatta i botten. Vi försummar behållarens egen värmekapacitet och räknar enbart på vattnet. Vattenkokarens elektriska effekt är 2000 W.

I ett experiment hade man $1,25$ liter vatten eller $1,25$ kg vatten. Det tog 4,5 minuter, motsvarande 270 sekunder att värma vattnet från 8 °C till 100 °C.

Vattnets värmekapacitet är 4190 J/kgK.

Nu kan vi beräkna Q_{in} som den energimängd som vi hämtar från det elektriska nätet

$$Q_{in} = 2000\,\mathrm{W} \cdot 270\,\mathrm{s} = 540\,\mathrm{kJ}.$$

Ökningen av vattnets inre energi kan vi beräkna från temperaturhöjningen

$$\Delta U = 4190\,\mathrm{J/kgK} \cdot 1,25\,\mathrm{kg} \cdot 92\,\mathrm{K} = 482\,\mathrm{kJ}$$

Energiprincipen ger oss sedan att förlusterna är

$$Q_{ut} = Q_{in} - \Delta U = 540\,\mathrm{kJ} - 482\,\mathrm{kJ} = 58\,\mathrm{kJ}$$

Förlusterna är alltså ca 11 %.

Lite mer om enheter

Lägg märke till hur enheterna fungerar i den uträkning vi just gjorde. Vi tar den igen, lite utförligare nu

$$\Delta U = 4,190\,\mathrm{kJ/kgK}\cdot 1,25\,\mathrm{kg}\cdot 92\,\mathrm{K} = 4,190\cdot 1,25\cdot 92\cdot\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}}\cdot\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K} = 482\,\mathrm{kJ}$$

Här har vi samlat ihop alla mätetalen för sig och alla enheterna för sig. Poängen är att man kan se enheterna som faktorer i en produkt. Värdet för en storhet är alltså ”mätetal gånger enhet”. När man samlar ihop enheterna för sig på detta sätt ser man hur den resulterande enheten efter förenkling blir riktig, i detta fall kJ.

Detta ger en extra kontroll på en uträkning. Resultatet måste få rätt enhet om sätter in rätt enheter i formeln, annars har man gjort fel någonstans.