

## 2. ENERGI

---

*Arne Jakobsen, Docent  
Maskinmesterskolen København  
aj@msk.dk*

*Kapitlet, Energi, kan læses selvstændigt, men er skrevet som et kapitel til en samlede lærebog indenfor Technical Facility Management, hvor omdrejningspunktet er indeklima og energiforbrug.*



**ELFORSK**

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 ([www.elforsk.dk](http://www.elforsk.dk)).

## 2.1. Indhold

2.1.	Indhold .....	2-2
2.2.	Læringsmål.....	2-3
2.3.	Nomenklatur.....	2-4
2.4.	Enheder .....	2-5
2.5.	Energi vs. Effekter og ”energikvalitet” .....	2-6
2.6.	Energikvaliteter .....	2-6
2.7.	Energiforbrugende komponenter og kredspocesser – idealitet og virkningsgrader .....	2-7
2.8.	Energiforbrug i Danmark .....	2-7
2.9.	Kort om energinøgletal .....	2-9
2.10.	Litteratur/henvisninger .....	2-10

## 2.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Anvende gængse enheder og præfix for energi
- Skelne mellem energi og effekt
- Kort redegøre for virkningsgrad i forhold til ideelle energifremstillende og forbrugende processer
- Redegøre for energikvalitets-forskellen mellem el og varme
- Forholde sig til energi-nøgletal for bygninger
- Relatere energiforbrug i forhold til Danmarks energiforbrug opdelt på el, varme og hovedsektorer

## 2.3. Nomenklatur

Benævnelse og symbol	Enhed	Beskrivelse
Q	J	Varme eller kulde
P (Power, typisk el)	W	Effektforbrug
T	°C	Temperatur
$\eta$	-, %	Virkningsgrad
Ex	J	Exergi
COP (EER)	-	Effektfaktor for køle- og/eller varmepumpeanlæg
Carnot		Betegnelse for den ideelle kredsproces hvor el, varme og køling indgår

## 2.4. Enheder

Grundenheden for energi er J (Joule). Hvis vi skal reducere denne til de øvrige- SI grundenheder får vi:

$$J = N \cdot m = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot m = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} \quad (2.1)$$

Der benyttes ofte præfix da 1 J i de fleste sammenhænge er en ganske lille energimængde, se Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Overblik over brugte enheder mht. energi

Enhed med præ-fix	Navn
$kJ = 10^3 J$	Kilojoule
$MJ = 10^6 J$	Megajoule
$GJ = 10^9 J$	Gigajoule
$TJ = 10^{12} J$	Terajoule
$PJ = 10^{15} J$	Petajoule

Enheden Wh (watt-time) bruges ofte

$$1Wh = 1 \frac{J}{s} \cdot 3600 s = 3600 J \quad (2.2)$$

Der benyttes ligeledes diverse præfix, eksempelvis  $1kWh = 3600kJ$ .

Lys har nogle særlige energi-enheder (lys-styrke). Effekten opgives i lumen: 1 lumen = 1/683 W.

Lysets intensitet på en flade angives i lux: 1 lux = 1 lumen/m<sup>2</sup>.

Dvs. en pæres lystyrke angives i lumen, medens belysningen på en bordoverflade angives i lux.

Vi kan "for sjovs skyld" udregne en virkningsgrad for en belysning på 500 lux på et 2 m<sup>2</sup>

arbejdsbord. Lad os antage at der er indkøbt en nyere LED pære, hvor effektforbruget er 5 W.

Den nyttige effekt på arbejdsbordet er:  $\frac{500 \cdot 2}{683} = 1,46W$  dvs. en "tænkt" virkningsgrad kan udregnes

til at være

$$\eta = \frac{1,46 \cdot 100\%}{5} = 29\%$$

## 2.5. Energi vs. Effekter og ”energikvalitet”

Energi pr tidsenhed er ”effekt” og måles i (W) Watt:  $1W=1 J/s$ .

### INFO BOKS:

Man kan se folk forveksle effekt og energi! Vær opmærksom på, at eksempelvis følgende udsagn giver ingen mening:

Anlægget bruger nu 1000 kWh

Der bruges 1000 kW/h

I nogle tilfælde anvendes kWh/h, og hvis det er brugt bevidst, så er her tale om gennemsnitseffekten i kW i en time.

## 2.6. Energikvaliteter

Energi kan have forskellige kvaliteter. Eksempelvis kan 100 J-el energi – omsættes fuldt ud til 100 J varme, medens der er et tab ved omsætningen fra varme til el. Dette afspejles eksempelvis i virkningsgraden for et kraftværk og virkningsgraden for en forbrændingsmotor.

Man taler om energiindholdet i energien og dette er det arbejde, som i en ideel proces kan produceres ud fra energien. El-energi kan i princippet omformes fuldt ud til arbejde og er derfor ren exergi, medens energiindholdet i en varmemængde afhænger af dens temperaturniveau:

Exergien  $Ex$  i varmemængden  $Q$  udtrykkes som:

$$Ex_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{(T_{omgivelser} + 273,15)}{(T_Q + 273,15)}\right) \quad (2.3)$$

Bemærk at temperaturen i udtrykket her er Celcius, da omregningen til Kelvin er inkluderet i udtrykket. Faktoren som ganges på energi-mængden kan (gen)kendes som virkningsgraden for den ideelle Carnot-kraftproces. Det bemærkes at varme ved omgivelsernes temperatur indeholder nul exergi. Dette stemmer med at denne varme ikke har noget ”arbejdspotentialer”. Jo højere temperatur en varmemængde har, jo højere exergiindhold.

Man kan tilsvarende tale om Exergi i køling. Køling er når vi fjerner varme ved en temperatur der er lavere end omgivelsernes temperatur.

Exergien  $Ex$  i kølemængden  $Q$  er:

$$Ex_Q = Q \cdot \left(\frac{T_{omgivelser}}{T_Q} - 1\right) \quad (2.4)$$

Dette kan fortolkes som det minimale arbejde der skal til for at tilvejebringe kølingen. Dette vil svare til at kølesystemet har en COP svarende til en ideel Carnot-køleproces.

## 2.7. Energiforbrugende komponenter og kredsprocesser – idealitet og virkningsgrader

Pumper og ventilatorer flytter volumenstrøm, hvor densiteten af mediet (luft, væske) er nogenlunde konstant. Derfor kan følgende udtryk for den teoretisk mindste tilførte effekt udtrykkes

$$P_{min} = V \cdot \Delta p. \text{ Altså den minimalt tilførte effekt er volumenstrøm gange trykstigning.}$$

Volumenstrømmen angives nogle gange som  $q_v$ .

Hvis volumenstrømmen angives i  $m^3/s$  og trykstigning i Pascal, så bliver effekten i W.

I en (køle)kompressor kan man ikke antage konstant densitet under processen, hvorfor man må benytte den isentrope proces som reference-proces. Arbejdet ved den isentrope proces kan findes i tilstandsdiagrammer ( $h, \log(p)$ ) eller findes i passende beregningsprogrammer.

Virkningsgrader er forholdet mellem den teoretisk mindst tilførte effekt (ofte isentrope) divideret med den faktiske effekt.

For en ”termisk” kredsproces, som arbejder mellem en høj temperatur ( $T_h$ ), og en lav temperatur ( $T_l$ ) er den såkaldte Carnot proces den mest ideelle proces.

Højeste virkningsgrad for arbejdsydende proces (motor, kraftværk, osv.):

$$\eta_{Carnot} = \left( 1 - \frac{(T_l + 273,15)}{(T_h + 273,15)} \right)$$

$$\text{Højeste COP for en køleproces er } COP_{Carnot} = \frac{T_l + 273,15}{(T_h - T_l)}.$$

$$\text{Højeste COP for en varmepumpeproces er } COP_{Carnot} = \frac{T_h + 273,15}{(T_h - T_l)}$$

Alle temperaturer indsættes i °C.

## 2.8. Energiforbrug i Danmark

De følgende 2015-data er fra Energistyrelsens hjemmeside. (<https://ens.dk/service/statistik-data-noegletal-og-kort/noegletal-og-internationale-indberetninger>).

Det samlede energiforbrug i Danmark var 615 PJ.

Med 5,7 mio indbyggere bliver det 109 GJ/indbygger.

Dette er  $109 \cdot 1000 \text{ MJ} / 3,6 \text{ MJ/kWh} \approx 30.000 \text{ kWh/indbygger}$

Rent sektor-mæssigt er det ”Handel og Service” som bedst dækker kontorer og butikker.

Husholdninger udgjorde 191 PJ og Handel & Service 80 PJ.

I husholdninger er 20 % el-forbrug medens 80% går til varme. El-andelen er dog stigende i takt med udbredelse af solceller og varmepumper.

I handel og service udgør elforbruget knap halvdelen og den resterende del til varme er lidt over halvdelen af energiforbruget.

Det samlede energiforbrug til bygninger udgør ca 40 % af de nationale energiforbrug i EU. I Danmark er energiforbruget til husholdninger ca 30% og energiforbruget til kontorer og butikker udgør godt 10% af det samlede energiforbrug.

Det kan være nyttigt at have nogle niveauer for specifikke energiforbrug, når man står overfor at skulle vurdere en bygnings energiforbrug. Det er dog ikke nogen "eksakt videnskab" at finde præcise tal.

I en tidligere aktiv Energiledelses Ordning fremkommer følgende tal gældende for butikcentre:

EL: 50 kWh/(år m<sup>2</sup>)

Varme 75 kWh/(år m<sup>2</sup>)

De tilsvarende tal for kontor er

EL: 36 kWh/(år m<sup>2</sup>)

Varme 96 kWh/(år m<sup>2</sup>)

Disse tal skal blot tages som et fingerpeg af en størrelsesorden. Man må forvente at tallene er "på vej ned" i takt med skærpede energikrav fra myndigheder.

Konkret haves følgende tal for Lyngby Storcenter

EL: 50 kWh/(år m<sup>2</sup>)

Varme 77 kWh/(år m<sup>2</sup>).

Dette passer utrolig godt med tallene – af lidt ældre dato fra ELO ordningen. Det skal bemærkes at forbruget er ved at blive reduceret i Lyngby Storcenter i forbindelse med en Energirenovering.

Generelt reduceres energiforbruget i bygninger takt med skærpede krav i bygningsreglementet. BR2015 angiver at det samlede energiforbrug (eller rettere; energiramme, som er et beregnet forbrug, og erfaring viser at det faktiske forbrug ofte er større) for kontorer skal være mindre end:

$$(41 + 1000 / A) \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}, \text{ hvor } A \text{ er det opvarmede areal i } m^2.$$

Bemærk at energiproduktion fra egne solceller kan fratrækkes det samlede faktiske energiforbrug. Den tilsvarende energiramme for boliger/hoteller er:

$$(30 + 1000 / A) \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}$$



Der er primært to energikilder i en bygning: el og varme. I bygningsreglementer op til BR15 bliver el-forbruget ganget med en faktor 2,5, svarende til at det kraftværk der producerer el har en virkningsgrad på 40%. Altså der skal 2,5 gange mere brændsel ind end der produceres el. Da samfundet er ved at gå over til stigende grad af CO<sub>2</sub> neutral el-produktion primært vindmøller og solceller, så er den faktor der skal ganges på el ”på vej ned”.

Hvis varmen produceres af fjernvarme, så skal varmen ganges på med en faktor under 1. Eksempelvis 0,8. Rationalet er at her er tale om brug af en eller anden fra af spildvarme. Konklusionen er at energiramme-beregningerne er under løbende opdatering i takt med at samfundets mål om at reducere CO<sub>2</sub> belastningen af klimaet realiseres. Derfor konsulter det relevante Bygningsreglement, når der skal udføres energirammeberegninger for en bygning.

## 2.9. Kort om energinøgletal

I det foregående afsnit blev der nævnt specifikke forbrug for energi – typisk pr (år·m<sup>2</sup>).

I produktionssammenhæng ville man ofte tale om energi pr produkt.

Da varmekonsumet i bygninger er stærkt afhængigt af udetemperaturen, så har man indført betegnelsen ”graddage” (graddag eller graddøgn bruges i flæng som det samme) for at synliggøre og evt. korrigere for denne sammenhæng. Hvis lufttemperaturen er over 17 °C, så er den øjeblikkelige graddøgn-værdi lig med nul. Tanken er at der ikke er behov for opvarmning – udover gratisvarme – når temperaturen er så høj.

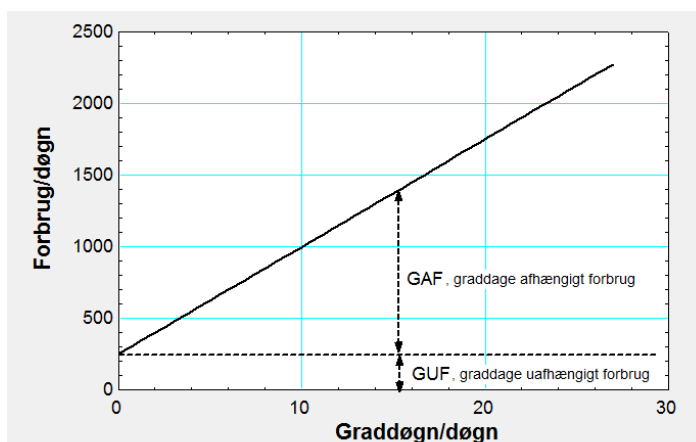
Beregning:

Denne kan gøres med en vilkårlig tidsopløsning. Hvis der eksempelvis måles en udetemperatur hvert femte minut (1/12 time), så vil dette tidsinterval være  $\frac{1}{12 \cdot 24} = \frac{1}{288}$  døgn. Hvis den målte temperatur i dette interval var 10 °C, så ville denne måling bidrage med:

$$(17 - 10) \text{ grad} \cdot \frac{1}{288} \text{ døgn} \approx 0,035 \text{ grad} \cdot \text{døgn}$$

Energiforbrug vil ofte have et mere eller mindre fast bidrag, som ikke er afhængigt af det ”målte produktionsbehov”. I nogle

sammenhænge vil det være en slags tomgangsforbrug, i opvarmningssammenhæng vil det ofte være forbrug af varmtvand, da det oftest ikke er afhængigt af udetemperaturen. Man taler da om opdeling af forbruget i fast forbrug (GUF) og et der er uafhængigt af udetemperaturen og en andel, GAF, der er afhængigt (ofte proportional) med hvor koldt det er (målt i graddøgn).



Figur 1. GUF og GAF i energiforbrug

## 2.10. Litteratur/henvisninger

Energiramme bygningsreglement: [http://historisk.bygningsreglementet.dk/br15\\_03\\_id104/0/42](http://historisk.bygningsreglementet.dk/br15_03_id104/0/42)

Omkring diverse teknologier omkring ventilation, opvarmning, køling, mv henvises til de øvrige kapitler, som indgår i denne lærebog.

Omkring generel introduktion til energi-forståelse henvises til diverse lærebøger i fysik og termodynamik.