

Niels Bandholm

Johannes Jensen

Gerhard Offenber

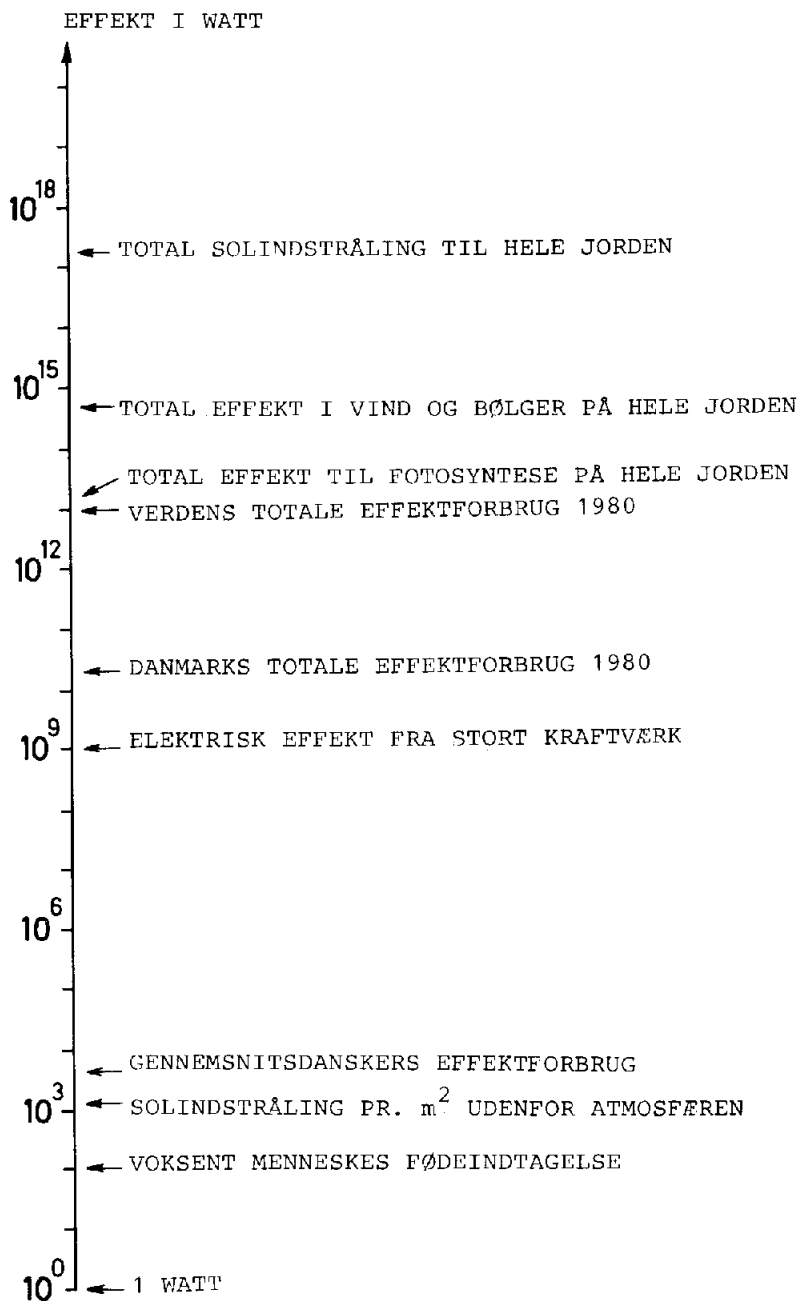
Hans Chr. Rasmussen

Henry Nielsen

ENERGILAGRING



VIGTIGE EFFEKT VÆRDIER



ENERGILAGRING

Niels Bandholm Johannes Jensen
Gerhard Offenberg Hans Chr. Rasmussen
Henry Nielsen

ENERGILAGRING

© Forfatterne samt F & K Forlaget.

Renskrivning af manuskript: Rie Vangkilde.

Forsidetegning: Verner Blak Nielsen.

Øvrige tegninger: Erik Mortensen.

Trykt hos Budolfi Tryk i Aalborg, 1982.

ISBN 87-87229-18-8

Bøgerne kan rekvireres ved skriftlig henvendelse til

F & K Forlaget

LMFK-Sekretariatet

Slotsgade 2³

2200 København N.

Indholdsfortegnelse

	side
FORORD	5
KAPITEL 1 ENERGIFORBRUG, ENERGILAGRING, ENERGIKVALITET	7
1.1 Globale betragtninger	7
1.2 Behovet for energilagring	9
1.3 Energikvalitet	12
1.4 Opgaver	19
KAPITEL 2 TERMISK ENERGILAGRING	22
2.1 Behovet	22
2.2 Lagermedier	25
2.3 Lagerligningen	30
2.4 Korttidslagre til solvarmeanlæg	32
2.5 Korttidslagre i fjernvarmesystemer	39
2.6 Sæsonlagre	41
2.7 Opgaver	49
KAPITEL 3 MEKANISK ENERGILAGRING	52
3.1 Potentiel energi i tyngdefeltet	52
3.2 Trykluftlagre	57
3.3 Svinghjul	62
3.4 Opgaver	65
KAPITEL 4 ELEKTRISK OG MAGNETISK ENERGILAGRING	68
4.1 Elektrisk energilagring	68
4.2 Magnetisk energilagring	71

INDHOLDSFORTEGNELSE

	side
KAPITEL 5 KEMISKE ENERGILAGRING	75
5.1 Kemisk energiberegning	75
5.2 Naturligt forekommende brændsel	83
5.3 Syntetisk brændsel	86
5.4 Brændselsceller	95
5.5 Sekundære batterier	98
5.6 Opgaver	105
KAPITEL 6 SAMMENFATNING	107
APPENDIX	112
Tekniske detaljer til Kapitel 3	112
ØVELSER I - VI	116
I Sæsonlager i fjernvarmesystem	116
II Trykluftlagring	122
III Gudenåcentralen	125
IV Kapacitor og induktor	129
V Blyakkumulatoren	133
VI Nikkel-Cadmium batteriet	138
LITTERATURLISTE	143

Forord

Med bogen "Energilagring" har vi forsøgt at realisere et længe næret ønske om at give en samlet fremstilling på gymnasieniveau af et emne, der vil få en stadig voksende betydning i de kommende år. Udvalgte dele af bogen kan efter vor mening indgå i fysik- og kemiundervisningen på alle tre grene af den matematiske linie.

Formålet med bogen er først og fremmest at give et samlet overblik over alle vigtige aspekter ved emnet energilagring. Vi lægger naturligvis stor vægt på at give en enkel fremstilling af de grundlæggende fysiske og kemiske principper bag de forskellige energilagringemetoder, men samtidig gør vi os umage med at få sat problemerne ind i en større samfundsmæssig og økonomisk sammenhæng. De korte tekniske beskrivelser af eksisterende anlæg og forsøgsprojekter skulle også hjælpe til at give eleverne en realistisk forståelse af, hvor langt man er nået på nuværende tidspunkt og hvilke problemer, der endnu mangler at blive løst.

Bogen er delt i to hovedafsnit. Første del består af selve teksten, der er organiseret i 6 kapitler med tilhørende opgaver. Mens kapitlerne 1 og 6 er af almen karakter, behandler kapitlerne 2-5 hver sin energilagringsform, nemlig termisk, mekanisk, elektromagnetisk og kemisk energilagring. Anden del består af 6 øvelser af såvel teoretisk som eksperimentel karakter. Vi har her lagt op til, at eleverne selv kan gå i dybden med et afgrænset emne i tilknytning til bogens hovedtema.

En oplagt måde at bruge bogen på vil være at koncentrere sig om én af de fire nævnte energilagringsformer. Vi gør dog opmærksom på, at alle eksemplerne på termisk energilag-

FORORD

ring i kapitel 2 er hentet fra opvarmningssektoren. På tilsvarende måde er næsten alle eksempler på mekanisk energilagring i kapitel 3 knyttet til forbruget af elektricitet, mens eksemplerne på kemiske energilagringssystemer (kapitel 5) har størst relevans for transportformål. Man kan altså uden vanskeligheder bruge bogen som grundlag for at studere energilagringsproblemer i forbindelse med den mere traditionelle inddeling efter samfundets energiforbrugssektorer. Skemaet herunder angiver de dele af bogen, der er relevante for tre tænkte undervisningsforløb. Har man mere tid til rådighed, kan forslagene naturligvis kombineres.

TEMA	KAPITLER	ØVELSER
1. Termisk energilagring eller Energilagring i opvarmningssektoren	1, 2, 6	I
2. Mekanisk og elektromagnetisk energilagring eller Energilagring i elforbrugssektoren	1, 2, 4, 6	II, III, IV
3. Kemisk energilagring eller Energilagring i transportsektoren	1, 5, 6	V, VI

Vi har under udarbejdelsen af denne bog fået hjælp og vejledning af mange mennesker, men vil specielt rette en varm tak til følgende for deres mange konstruktive forslag til forbedringer: F. Bason, C. Clausen, F. Elvekjær, C.P. Knudsen, K. Jørgensen og H. Parbo. Vi ønsker også at takke de elever på Risskov Amtsgymnasium, der har været med til at afprøve foreløbige versioner af bogen.

Niels Bandholm

Henry Nielsen

Johannes Jensen

Gerhard Offenbergl

Hans Chr. Rasmussen

1. Energiforbrug, energilagring, energikvalitet

1.1 Globale betragtninger

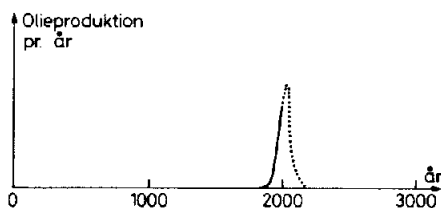
I årtierne forud for oliekrisen i 1973, hvor de olieproducerende lande fik gennemtruffet en 3-4 dobling af prisen på råolie, blev en stedse stigende andel af verdens energiforbrug dækket af olieprodukter. Mens oliens andel kun udgjorde 9% i 1920, var dette tal i 1973 vokset til ca. 50% (70% hvis man medregner naturgas). Og det skal tilføjes, at verdens energiforbrug steg meget kraftigt i den mellemliggende periode, nemlig fra 41 EJ (1,3 TWy) i 1920 til ikke mindre end 253 EJ (8,0 TWy) i 1973*. Denne vækst i olieforbruget blev muliggjort af de meget store oliefund i Mellemøsten. Olien viste sig at være fantastisk billig både at udvinde og at transportere til forbrugerlandene. Hertil kommer naturligvis, at olie er langt mere bekvem at have med at gøre end f.eks. kul. Specielt i industrilandene var man således blevet totalt afhængig af denne ene energikilde. Resultatet heraf var, at olien var blevet en magtfaktor af stor betydning. Oven i købet var denne magt koncentreret på det geografisk set lille område i Mellemøsten.

Oliekrisen i 1973 var ikke udtryk for en egentlig oliemangel. Krisen var politisk bestemt og mundede, som allerede nævnt, ud i store prisforhøjelser på råolie. På længere sigt var krisen ikke desto mindre en tiltrængt advarsel om, at perioden med uhæmmet forbrug af billig olie hastigt nærmer sig sin afslutning. Alle førende olieeksporterer er

(*) Omregningstabel mellem forskellige energienheder findes på bogomslagets side 3.

enige om, at olieressourcerne ikke vil kunne dække den stadig stigende efterspørgsel ret længe endnu. Olieproduktionen synes at skulle toppe omkring år 2000, og en væsentlig del af verdens energiforbrug må altså på få årtier flyttes over på andre energikilder.

Når man desuden erindrer sig, at anvendelse af olie først begyndte for godt 100 år siden, bliver det lysende klart, at den nuværende epoke i menneskehedens historie er noget helt specielt. I årtusinder har mennesket måttet eksistere uden olie som energikilde, nu forbruges hele oliekapitalen over en yderst kort periode af 1-200 års varighed, og derefter er man igen henvist til at klare sig uden olie i al fremtid. Dette er illustreret i figur 1.1.



Figur 1.1 Det oliebaserede samfund vil kun være en kort episode i menneskehedens historie (Hubbert, 1969).

Hvilke energikilder kan da komme på tale som afløsere for olien?

I den forestående vanskelige omstillingsperiode vil man naturligvis interessere sig for alle energikilder, hvad enten deres potentielle bidrag til energiforsyningen er stort eller lille. Set i det store perspektiv er der imidlertid kun tre kilder, der over en længere periode vil kunne tilfredsstille energibehovet i en verden med måske 10 milliarder mennesker, hvis disse skal have en blot acceptabel levestandard (Martinsen og Nielsen, 1981).

De tre energikilder er kul, kerneenergi og solenergi*. Heraf er de to førstnævnte eksempler på lagerenergi - altså

(*) I denne sammenhæng omfatter solenergi foruden sollys også vandkraft, vindenergi, bølgeenergi, træ, biogas etc., (fortsættes næste side)

energi, som er begrænset af mængden af bestemte energiråstoffer på jorden - medens solenergi når jorden som en vedvarende energistrøm.

Vi skal ikke her komme ind på en udførlig sammenligning af fordele og ulemper ved energisystemer, der er baseret på én eller flere af disse energikilder. Derimod vil vi i næste afsnit forsøge at anskueliggøre, at uanset hvilke energikilder mennesket vælger at satse på, vil der være et stort behov for at kunne lagre energi.

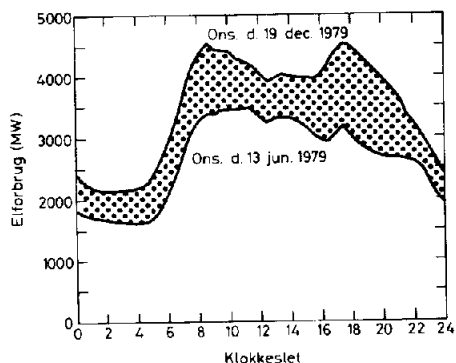
1.2 Behovet for energilagring

Det kan være rimeligt at starte med at spørge sig selv, hvorfor olien er blevet en så dominerende energikilde, som tilfældet er. Der findes naturligvis ikke én enkelt grund hertil, men det har i hvert fald noget at gøre med, at prisen på olie har været lav sammenlignet med prisen på andre energikilder. En anden og mindst lige så vigtig grund er at finde i oliens fremragende egenskaber i lagringsmæssig henseende. Den fyldte olietank har alle de kvaliteter, man kan forlange af et godt energilager. Vi behøver her blot at pege på sådanne egenskaber som stor energi pr. volumenenhed, lang tabsfri lagringstid, beskedne materialekrav og prisbillighed. Hertil kommer mange anvendelsesmuligheder. Lagerets indhold kan nemlig både anvendes til opvarmningsformål, transportformål og som råstof i den kemiske industri. Vi bør specielt notere os, at det fremfor noget andet er den fyldte olietank, der har sat industrilandenets befolkning i stand til at få realiseret deres ønsker om komfort (opvarmning og belysning) og transport (biler, tog, skibe og fly).

da disse energikilder i sidste instans alle har deres oprindelse i Solens stråling.

Ligeledes er kerneenergi en fællesbetegnelse for fissionsenergi, der frigøres, når tunge atomkerner (f.eks. uran) spaltes i lettere bestanddele, og fusionsenergi, der frigøres, når lette atomkerner (f.eks. deuterium) smelter sammen til tungere kerner.

Elproduktionssektoren. Det er indlysende, at elværkerne af hensyn til forsyningssikkerheden hele tiden sørger for at ligge inde med betydelige brændselslagre. For de danske elværkers vedkommende drejer det sig i første række om kul og olielagre til mere end 1/2 års forbrug. Men desuden er det vigtigt at gøre sig klart, at elværkerne af økonomiske grunde også gerne vil være i stand til at oplagre elektrisk energi, efter at den er blevet produceret - og dette gælder uanset hvilken primær energikilde, der benyttes til elproduktion. Årsagen hertil er den stærke døgnvariation i elforbruget, som man kan iagttage i alle lande. Figur 1.2 viser således den samlede belastning på de danske elværker henholdsvis en sommerdag og en vinterdag i 1979; det ses heraf, at belastningen varierer med noget, der ligner en faktor 2 i døgnets løb. Men det betyder, at man kun kan lade ca. halvdelen af elproduktionen foregå på de såkaldte grundlastkraftværker (d.v.s. store kulfyrede enheder, der skal køre på fuld kapacitet hele døgnet). Toppene i elbehovet må derimod dækkes ved hjælp af mindre enheder, der hurtigt kan startes op og kobles på nettet, når behovet opstår. Disse enheder betegnes gerne som spidslastkraftværker.



Figur 1.2 Det danske elforbrug varierer både over døgnet og året, som det ses på kurverne. Øverste og nederste kurve viser belastningen henholdsvis et vinterdøgn og et sommerdøgn. Kilde: Danske Elværkers Forenings Udredningsafdeling (DEFU).

Da ethvert elværk repræsenterer en stor investering i form af anlægsudgifter, er det følgelig vigtigt at udnytte værket

bedst muligt. Man vil derfor forstå, at de stærkt udnyttede grundlastværker kan producere strøm betydeligt billigere end spidslastværkerne. Såfremt elselskaberne får mulighed for at lagre elektrisk energi billigt, vil det følgelig kunne betale sig at bygge flere grundlastværker og lade dem overtage en større del af elproduktionen. Ganske vist vil de om natten producere for megen elektricitet i forhold til forbruget, men den overskydende elektriske energi kan så gemmes i energilageret til spidsbelastningerne den følgende dag.

For en ordens skyld bør det nævnes, at de danske elværker i beskedent omfang allerede har en sådan energilagringssmulighed i kraft af kabelforbindelser til det svenske og det norske elnet. Herved kan naturlig elproduktion i Danmark nemlig benyttes til at lagre vand i højtliggende svenske og norske vandreservoirer. Men dette emne vil vi vende tilbage til i kapitel 3.

Transportsektoren. Olieprodukter har mere end nogen anden energikilde øget vor mobilitet*. Ønsker vi at opretholde samme mobilitet, når olien bliver en mangelvare, er det altså bydende nødvendigt at udvikle et godt og billigt drivmiddel med tilhørende transportabelt lager. Dette gælder uanset om det fremtidige oliefattige samfund fortrinsvis får sin energi fra kul, uran eller sol. Ganske vist er elektriske tog og sporvogne uafhængige af et sådant lager, men den mange gange større vej-, luft- og søtransport lader sig ikke uden videre binde til at følge elektriske ledninger!

Som energilager i fremtidens transport er der på nuværende tidspunkt adskillige kandidater med hver deres plusser og minusser. Nogle af disse kandidater er brændstoffer som methanol, ethanol og hydrogen (brint) samt avancerede elbatterier. En udførlig gennemgang af hele denne emnekreds vil blive givet i kapitel 5.

Opvarmningssektoren. En meget betydelig del (ca. 45%) af det danske bruttoenergiforbrug går til bygningsopvarmning

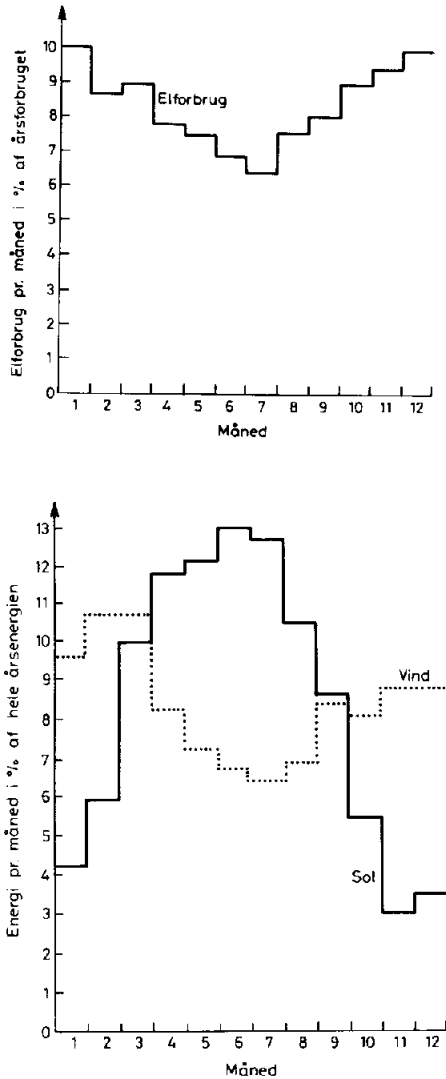
(*) mobilitet = transportevne

og til produktion af varmt brugsvand. Mens behovet for rumopvarmning er nogenlunde konstant i døgnets løb, er behovet for varmt brugsvand stærkt koncentreret på dagtimerne. Derimod gælder det, at vi bruger langt mere energi til rumopvarmning i vintersæsonen end i sommersæsonen, mens forbruget pr. døgn af varmt brugsvand er nogenlunde uafhængig af årstiden. Det er selvfølgelig klart, at der findes en stærk økonomisk tilskyndelse til at få udviklet billige døgnvarmelagre såvel som sæsonvarmelagre. Vi behandler hele dette emne udførligt i kapitel 2.

Energilagring og vedvarende energi. Det er umiddelbart indlysende, at de vedvarende energikilder (sol-, vind-, bølge- og tidevandsenergi) ikke kan blive afgørende faktorer i verdens energiforsyning, med mindre de bliver suppleret med gode energilagringssfaciliteter. Disse energikilder er alle ustadige, og energien produceres altså ikke altid, når der er behov for den. Derfor er det nødvendigt at gemme energi fra perioder med stor energiproduktion til perioder med ringe eller slet ingen energiproduktion. Tager vi Danmark som eksempel, viser simple beregninger (G.Christiansen og S.Blegaa, 1979), at såfremt landet skal have hele sit elbehov dækket ved hjælp af sol alene, må energilageret svare til ca. 1/2 års forbrug, hvilket skyldes, at solstrålingen og energiforbrugets sæsonmæssige variation er helt ude af fase. I modsætning hertil er der rimelig god overensstemmelse mellem den sæsonmæssige variation i elbehovet og vindeffekt i Danmark. Disse forhold fremgår af figur 1.3.

1.3 Energi kvalitet

Energiformer og energikvalitet. I vore omgivelser møder vi mange forskellige former for energi: Således er vandet i en højtliggende sø i besiddelse af potentielt energi, medens det strømmende vand i en flod eller i et vandfald er i besiddelse af kinetisk energi; i en elektrisk kondensator og i en strømførende spole er der henholdsvis elektrisk og magnetisk



Figur 1.3 (a) Årsvariationen af elforbruget i Danmark.
 (b) Den fuldt optrukne kurve viser den procentvise solstråling måned for måned på en sydvendt flade, som danner vinklen 50° med vandret. Gennemsnitstal 1959-69 (Solvarme, 1980). Den punkterede kurve viser den procentvise vindeenergi måned for måned i 56 meters højde ved Risø. Gennemsnitstal for perioden 1958-67 (B. Sørensen, 1979).

energi; de fossile energikilder kul, olie og gas indeholder kemisk energi og i grundstofferne uran, thorium og deuterium er der kerneenergi. Endelig siger vi, at varmt vand indeholder termisk energi, men den termiske energi i vandet er i virkeligheden udtryk for uordnet (tilfældig) bevægelse hos vandets molekyler (jo højere temperatur, jo højere er vandmolekylernes gennemsnitlige kinetiske energi). I modsætning hertil finder vi en ordnet bevægelse hos vandmolekylerne i en strømmende flod eller hos elektronerne i en strømførende leder.

Alle de ovennævnte energiformer kan måles i samme energienhed, f.eks. i joule (J) eller i kilowatt-timer (kWh). Dette betyder ikke, at de alle er lige meget værd. Vi måler en energiforms værdi - dens energi kvalitet - ved dens evne til at udføre arbejde for os (f.eks. ved at hæve et lod, at dreje et hjul, at skubbe et stempel o.s.v.). Og her gælder det, at der er en udtalt forskel på energikvaliteten hos de ovennævnte energiformer: Kinetisk, potentiel-, elektrisk-, magnetisk-, kemisk- og kerneenergi kan i princippet omsættes næsten 100% til arbejde; de kaldes derfor høj-kvalitetsenergiformer. Termisk energi, der som før nævnt tilskrives uordnet partikelbevægelse, lader sig derimod kun delvis omsætte til arbejde og kaldes derfor lavkvalitetsenergi. Den del af en given mængde termisk energi, der rent faktisk kan omsættes til arbejde, er afhængig af temperaturen. Betragt eksempelvis et stort varmereservoir med den absolutte temperatur T_V og med omgivelsernes (atmosfærens) temperatur T_K^* . Da gælder, at det maksimale nyttige arbejde ($A_{\max}$), der kan leveres af energimængden (E_{term}) fra det varme reservoir, er givet ved

$$A_{\max} = E_{\text{term}} \cdot \left(1 - \frac{T_K}{T_V}\right) \quad (1.1)$$

For alle høj-kvalitetsenergiformer er derimod

$$A_{\max} = E_{\text{kin}}, E_{\text{pot}} \text{ etc.} \quad (1.2)$$

(*)

V står for varme og K for kold.

Ligning (1.1) og (1.2) er konsekvenser af de fundamentale termodynamiske love, der lidt løst formuleret siger følgende:

- 1.lov: Ved enhver proces i et lukket system er den samlede energi bevaret.
- 2.lov: Ved enhver proces i et lukket system vil den samlede uorden enten vokse eller forblive konstant.
Eller sagt på en anden måde:
Ved enhver proces vil den samlede energikvalitet enten aftage eller forblive konstant.

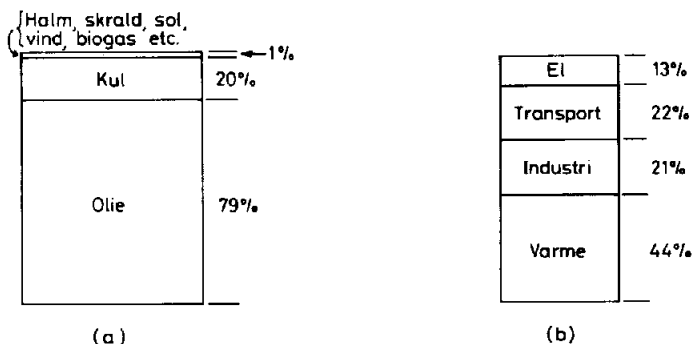
I dagligdagen bruger vi ofte udtrykkene "energikrise" og "energitab", men ifølge ovenstående er dette egentlig forkert. Termodynamikkens 1.lov udsiger jo, at energi som sådan aldrig kan gå tabt. Energien kan overgå fra én form til en anden, men den samlede energi vil altid forblive den samme. Det, der derimod kan gå tabt, er ifølge termodynamikkens 2.lov den samlede energikvalitet, altså evnen til at udføre arbejde.

Eksempel. Lad os betragte 1 m^3 vand i en højtliggende sø, og antage at søen via en flod har afløb til havet. På vej ned ad floden omdannes vandets oprindelige potentielle energi gradvist til ordnet kinetisk energi og endelig til sidst til uordnet kinetisk energi (varme) i flodbunden og i havet. Når dette er sket, er den oprindelige energi stadigvæk til stede, men rigtignok på en form, som er ubrugelig for os (se opgave 1.3).

Vi kan naturligvis bare os snedigere ad. Vi kan f.eks. installere et vandkraftværk ved flodens løb og altså lade det strømmende vand drive en turbine rundt. Denne kan så trække en generator, der producerer elektricitet til el-nettet. Ved denne fremgangsmåde bliver en del (ca. 80%) af vandets oprindelige potentielle energi til nyttigt arbejde, og resten bliver til termisk energi i havet eller i turbinens og generatorens lejer. Men til syvende og sidst vil også den nyttige elektriske energi blive til termisk energi - enten i ledningsnettet eller ude i de enkelte forbrugerens lamper, motorer o.s.v. Energitilstanden vil altså stedse forringes, men denne kvalitets-

forringelse kan gå mere eller mindre hurtigt; og mens energien endnu har høj kvalitet, kan vi bruge den til at udføre nyttigt arbejde for os.

Energiforbrug og energikvalitet. Det er en konsekvens af det, vi har diskuteret ovenfor, at det i videst mulig omfang gælder om at spare på de fine højkvalitetsenergikilder og helst ikke bruge dem til underlødige formål. Sagen er nemlig den, at samfundet har behov for energi af meget forskellig kvalitet. Således havde det danske samfund i 1979 et bruttoenergiforbrug* på 797 (PJ), der stort set blev dækket af olie (79%) og kul (20%) mens resten (1%) kom fra halm, skrald, træaffald etc. Dette energiforbrug fordeltes på anvendelsesområder, som vist i figur 1.4.



Figur 1.4 Det danske bruttoenergiforbrug på 797 PJ i året 1979, fordelt på primære energikilder (a) og på anvendelsesområder (b). Kilde: (Danmarks Energibalance, 1979).

(*) Ved bruttoenergiforbruget (også kaldet det primære energiforbrug) forstås energiindholdet i de primære energikilder kul, råolie, uran etc. inden de omdannes til mere forbrugervenlige (sekundære) energiformer som benzin, elektricitet, fjernvarme og lignende. Ved disse omdannelser sker der i reglen betydelige tab (de såkaldte centrale konverteringstab).

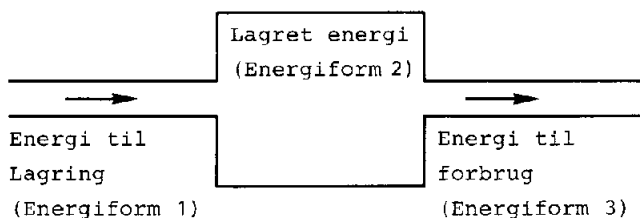
I de to øverste anvendelsesområder (el og transport) er der brug for højkvalitetsenergi, og det er derfor rimeligt at dække disse anvendelsesområder med kul og olie. Ser vi derimod på rumopvarmning, er det ønskede produkt udpræget lavkvalitetsenergi (varme ved ca. 20°C); termodynamisk set vil det derfor være rimeligt at dække en stor del af dette forbrug ved hjælp af f.eks. spildvarme fra kraftværker og industrier, geotermisk energi, solvarme og lignende. I dagens danske samfund sker dette dog kun i begrænset udstrækning - langt den største del af boligopvarmningen foregår ved hjælp af olie, der afbrændes i private oliefyr eller lokale fjernvarmeværker. I løbet af 80'erne vil 60-70% af Danmarks boligopvarmning blive lagt om fra olie til naturgas og kraftvarme* med ca. halvdelen til hver. Da naturgas er mindst lige så fin en energikilde som olie, er det åbenbart ikke termodynamiske overvejelser, der ligger bag en sådan omlægning. Årsagerne til, at man vil anvende naturgas til opvarmningsformål, angives da også at være økonomiske og forsyningsmæssige, men dette er ikke stedet til at gå i en nærmere diskussion af hele denne problemstilling. (Energiministeriet, 1981).

Energilagring og energikvalitet. Det skulle fremgå af diskussionen ovenfor, at energiforbrug og energiforsyning bør være afstemt efter hinanden i kvalitetsmæssig forstand. Altså: et behov for højkvalitetsenergi bør dækkes af højkvalitetsenergikilder, medens behov for lavkvalitetsenergi i videst mulig omfang bør søges dækket med lavkvalitetsenergikilder.

I afsnit 1.2 så vi, at selv om den fyldte olietank repræsenterer næsten idealet af et energilager, så er det alligevel ønskeligt med yderligere store lagringssystemer i det

(*) Ved elproduktion bliver kun ca. 1/3 af energiindholdet i det anvendte brændsel til elektrisk energi, resten må ledes bort med meget store mængder kølevand. Såfremt det opvarmede kølevand bruges til boligopvarmning omtales det som kraftvarme; udnyttes det ikke, taler man derimod om spildvarme.

nuværende oliebaserede samfund (bl.a. til udjævning af elværkernes døgnbelastning). I et fremtidigt samfund, hvor olieprodukter er en mangelvare, og hvor energiforsyningen for størstedelens vedkommende dækkes af kernekraft eller kul, er der desuden et uomgængeligt behov for lagring af meget store energimængder til stationære formål (elforsyning og varmforsyning). Det følger derfor, at man ikke kan nøjes med at udvikle én bestemt type energilager, men at der må arbejdes kraftigt på at udvikle lagersystemer for såvel højkvalitets- som lavkvalitetsenergi.



Figur 1.5 Skematisk beskrivelse af den generelle lagringsproces.

I resten af bogen skal vi gå nærmere ind på de former for energilager, der enten eksisterer eller er ved at blive udviklet. Bemærk at den fyldte olietank er et meget simpelt lagringssystem, hvor energien under påfyldning, lagring og aftapning befinder sig på samme form. Ved mange andre lagringssystemer foregår der en energiomformning på indgangs- og/eller udgangssiden, således at den generelle energilagringsituation kan fremstilles som i figur 1.5. Vi har valgt at behandle emnet ud fra energilagingsformen, altså efter den form, som energien har, når den befinder sig i energilageret. I kapitel 2 skal vi beskæftige os med lagring af lavkvalitetsenergi, altså termisk energi; de følgende kapitler behandler derimod efter tur lagring af de tre højkvalitetsenergiformer: mekanisk, elektromagnetisk og kemisk energi. I alle tilfældene er nøgleparametrene til vurdering af energilagerets godhed (1) dets energitæthed, (d.v.s dets maksimale energiindhold for masse- eller rum-

fangsenhed), (2) dets effekttæthed (d.v.s. effekten under påfyldning og aftapning pr. masse eller rumfangsenhed), (3) dets energitab ved lagringsprocessen og (4) dets levetid.

1.4 Opgaver

1. Vedvarende energi i Danmark

- (a) Antag, at man vil forsøge at dække hele Danmarks elforbrug med el fra henholdsvis solceller og vindmøller. Antag også, at vi råder over så store tabsfrie energilagre, at disse kan rumme energi nok til mere end $\frac{1}{2}$ års energiforbrug.
- 1) Hvor stor et solcelleareal vil være nødvendigt, når solcellerne er 10% effektive i omdannelsen af solenergi til elektricitet?
 - 2) Hvor stort er det nødvendige overstrøgne vindmølleareal, når vindmøller er 30% effektive i omdannelsen af vindenergi til elektricitet?
- (b) Antag (lidt mere realistisk), at vi kun råder over energilagre, der kan rumme energi til ca. 1 måneds elforbrug.
- 3) Hvor store bliver de nødvendige arealer i denne situation?
 - 4) Hvor store er disse arealer sammenlignet med hele Danmarks areal?

Nødvendige oplysninger:

Danmarks årlige elforbrug (1978)	$23.5 \times 10^9 \text{ kWh}$
Gennemsnitlig årlig vindenergi gennem 1 m^2 mølleareal	3200 kWh
Gennemsnitlig årlig solenergi på 1 m^2 solcelleareal (sydvendt, 45° hældning)	1200 kWh

Til besvarelse af spørgsmål (3) skal man desuden benytte figur (1.3).

2. Energi-kvalitet

Tilberedning af badevand kan noget idealiseret fremstilles på følgende måde:

- (a) Start med 1 kg fyringsolie (energiindhold: 42000 kJ/kg)
- (b) Afbrænd olien i et 100% effektivt oliefyr. Vi kan her-ved opvarme x kg vand fra 10°C til 60°C .
- (c) De x kg vand $\hat{a}$ 60°C blandes med y kg koldt vand $\hat{a}$ 10°C , s\aa blandingen opn\aa r badevandstemperaturen 35°C .

Besvar p\aa grundlag af disse oplysninger f\o lgende sp\o rgsm\aa l:

- 1) Hvor stor er x , og hvor stor er y ?
- 2) Hvor stort er det maksimale nyttige arbejde A_{max} (jfr. ligningerne (1.1) og (1.2)), som principielt vil kunne udf\o res p\aa hvert af trinene (a), (b) og (c). Omgivelsernes temperatur s\aa ttes til 10°C , og der ses bort fra energitab til omgivelserne.

3. Vandfald (denne opgave knytter sig til eksemplet p\aa si-de 15).

- (a) Idet det antages, at sj\o ens vand befinder sig 300 m over havets niveau, skal man beregne den potentielle energi i 1 m^3 vand i sj\o en.
- (b) S\aa fremt denne energi fuldst\aa ndig omdannes til termisk energi ved at vandet falder de 300 m, og s\aa fremt denne energi i f\o rste omgang forbliver i den samme kubikmeter vand, hvor meget vil da vandets temperatur stige? Hvor stort er det maksimale arbejde A_{max} , som i princippet vil kunne udf\o res af den termiske energi i denne ene kubikmeter vand, n\aa r det omgivende havs temperatur s\aa ttes til 10°C ?
- (c) Antag, at vi i stedet lader vandet drive en turbine med tilh\o rende generator, som omdanner 80% af vandets oprindelige potentielle energi til elektrisk energi; de resterende 20% t\aa nkes igen omsat til termisk energi, der forbliver i den samme kubikmeter vand. Hvor stor bliver nu temperaturstigningen, og hvor stor bliver den samlede v\aa rdi for A_{max} ?

4. Energilagringsformer

Prøv om du kan angive nogle eksempler på naturlige, henholdsvis menneskeskabte energilagre, hvor den lagrede energi er på en anden form end energien før eller efter lagret (jfr. figur 1.5).

2. Termisk energilagring

2.1 Behovet

I kapitel 1 beskrev vi ved eksempler behovet for at kunne lagre energi i kortere eller længere tid. Vi vil her uddybe dette emne for så vidt angår lagring af termisk energi.

Forbruget af termisk energi i Danmark fordeler sig på to klart adskilte områder, nemlig opvarmning af bygninger (herunder forsyning med varmt brugsvand) og procesvarme i industrien. Da bygningsopvarmning udgør langt den største post (ikke mindre end 44% af DK's primære energiforbrug i 1975 gik til dette formål), vil vi i det følgende koncentrere os herom.

For at kunne vurdere behovet for termisk energilagring, må vi vide noget om, hvorledes forbruget rent faktisk varierer over døgnet og over året. Naturligvis er der meget store forskelle fra husstand til husstand som følge af forskelle i livsstil, men det, der interesserer os her, er hvorledes en gennemsnitsfamilies forbrug varierer.

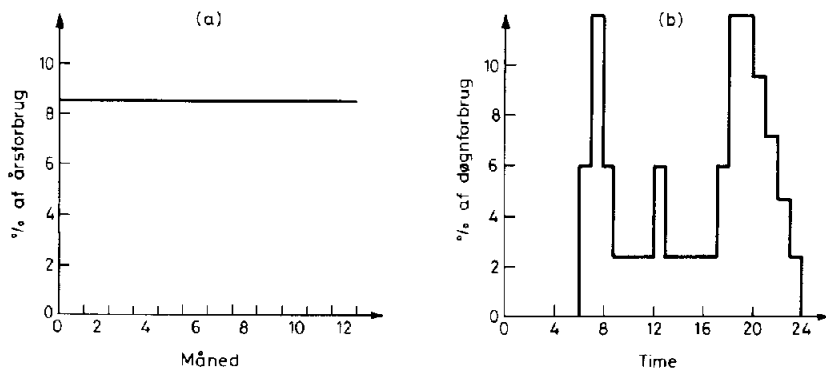
Først det varme brugsvand. Her viser erfaringen, at behovet er ret så konstant i årets løb - vi bruger nogenlunde samme mængde varmt vand på en sommerdag som på en vinterdag. Derimod viser varmtvandsforbruget en udpræget døgnvariation; forbruget er stort i morgen- og aftentimerne, beskedent midt på dagen og næsten nul i de sene nattetimer. På grundlag af forskellige forbrugsundersøgelser har man i referencen (Solvarme, 1980) opstillet en model for et typisk varmvandsforbrug, og denne model er gengivet i figur 2.1(a) og 2.1(b). Som en meget grov tommelfingerregel kan man regne med et varmtvandsforbrug pr. person og pr. døgn på 50 liter vand opvarmet fra 10°C til 60°C (se i øvrigt opgave 2.1).

Den energi, der skal tilføres en given bolig for at opretholde en indetemperatur på ca. 20°C , varierer først og fremmest med udetemperaturen, men faktorer som vindhastighed og luftfugtighed spiller dog også en vis rolle. Ud fra vejrstatistikken kan man følgelig beregne, hvorledes varmebehovet i gennemsnit vil variere over årets måneder. Dette er f.eks. gennemført i (Solvarme, 1980) og resultatet er vist i figur 2.2(a). Opvarmningsbehovet varierer altså meget kraftigt med årstiden, hvorimod døgnvariationen for de nuværende varmeinstallationer (uden natsænkingsudstyr) er ret så beskeden. I figur 2.2(b) viser vi en typisk variation i løbet af et vinterdøgn, således som den f.eks. kan registreres på et fjernvarmeværk.

På grundlag af disse oplysninger må vi altså konkludere, at varmtvandsbehovet udviser en betydelig døgnvariation og en meget ringe årsvariation, hvorimod rumopvarmningsbehovet udviser en ringe døgnvariation og en meget stærk årsvariation. Dertil kommer, at rumopvarmningsbehovet er underkastet ret store svingninger, der skyldes vejrligets uregelmæssige karakter. Alt i alt varierer det samlede behov på en ret kompliceret måde, hvilket er besværligt set fra et energiforsyningssynspunkt. Hvis varmforsyningen skal klares af et fjernvarmeværk, et kraftvarmeværk eller for den sags skyld et privat oliefyr, vil det meget ujævne forbrug give anledning til en uøkonomisk produktion. Årsagen hertil er, at anlægget må dimensioneres til at kunne klare det størst tænkelige forbrug, der naturligvis er langt større end gennemsnitsforbruget. Hvis forbruget i stedet søges dækket af vedvarende energianlæg (f.eks. solvarme) løber man ind i et andet problem, nemlig at energiproduktionen da vil variere på en helt anden måde end energiforbruget. Under alle omstændigheder vil der altså være et betydeligt behov for billig lagring af termisk energi. Man skelner normalt mellem tre typer af energilagre, nemlig

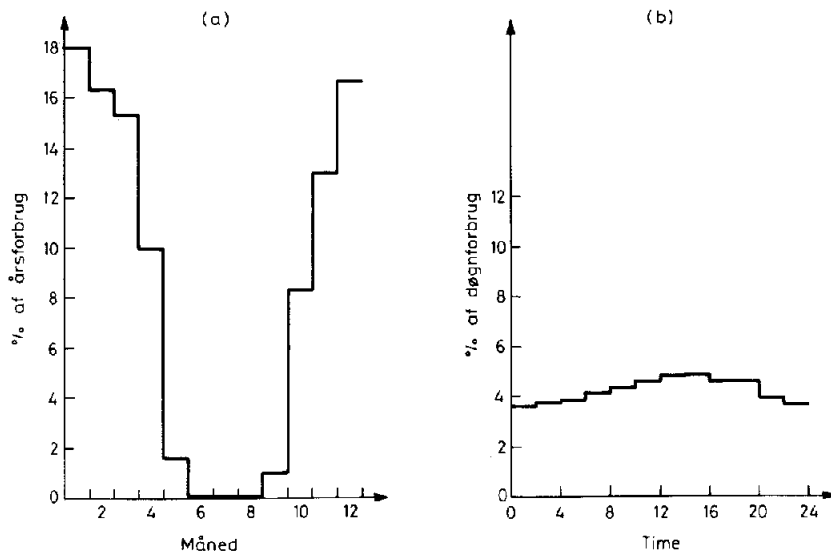
- Korttidslagre til udjævning af døgnvariationer
- Mellemtidslagre til udjævning af uregelmæssige variationer, der skyldes vejret (typisk varighed: 1 uge).
- Langtidslagre til udjævning af årstidsvariationer.

Varmtvandsforbrug



Figur 2.1 (a) Typisk variation af varmtvandsforbrug over et år. (b) Typisk variation af varmtvandsforbrug over et døgn. Kilde: (Solvarme, 1980).

Rumopvarmningsforbrug



Figur 2.2 (a) Typisk variation af rumopvarmningsforbrug over et år. (b) Typisk variation af rumopvarmningsforbrug over et døgn. Kilde (Solvarme, 1980); (Elsam, 1976).

I praksis vil der naturligvis være en glidende overgang mellem de to første typer lagre. For overskuelighedens skyld vil vi derfor i det følgende indskrænke os til at skelne mellem to væsensforskellige typer, der vil blive betegnet som henholdsvis korttidslagre og langtidslagre.

2.2 Lagermedier

Vi har i forrige afsnit argumenteret for det rimelige i at opdele termiske energilagre i korttids- og i langtidslagre, afhængig af den tid lageret skal kunne opbevare energi. Man inddeler imidlertid også termiske lagre efter lagringsprincip. Således taler man om

- varmfyldelagre
- faseændringslagre
- kemiske reaktionslagre,

der alle vil blive kort omtalt i det følgende.

Varmefyldelagre

I denne form for lagre akkumulerer man termisk energi ved at forøge lagermediets temperatur. Fastsetter vi, at det termiske energiindhold E_ℓ af lagermediet er nul, når dets temperatur er lig med omgivelsernes temperatur, gælder der:

$$E_\ell = m_\ell \cdot c_\ell \cdot (T_\ell - T_{\text{omg}}) \quad (2.1)$$

hvor

m_ℓ = lagermediets masse (kg)

c_ℓ = " specifikke varmekapacitet ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_ℓ = " temperatur (K)

T_{omg} = omgivelsernes temperatur (K)

Det fremgår umiddelbart, at man for at opnå høj lagringskapacitet i forhold til lagervolumets størrelse, må benyttes materialer med høj massetæthed og høj specifik varmekapacitet. Materialet må naturligvis heller ikke være for dyrt, og det indskrænker de praktiske muligheder ganske stærkt. I tabel 2.1 angives massetæthed og varmekapacitet for en række almindeligt forekommende stoffer:

Materiale	ρ_{ℓ} (kg/m ³)	c_{ℓ} (kJ/(kg·K))	Varmekapacitet per volumenenhed (MJ/(m ³ ·K))
Vand	1000	4,2	4,2
Olie	800	2,0	1,7
Grus, sten	1300-2200	0,8	1,1-1,9
Beton	2400	0,8	2,1
Jern	7860	0,5	3,6

Tabel 2.1 Varmelagringsegenskaber for udvalgte stoffer.

Tabellen viser, at vand har den højeste varmekapacitet pr. volumenenhed. Da det desuden er billigt og let at opbevare, har det altså sin naturlige forklaring, at næsten alle danske solvarmeanlæg benytter vand som lagermedium. Et vand-varmelager har i øvrigt også den fordel, at det uden vanskeligheder lader sig kombinere med det mest traditionelle opvarmningssystem, vi kender her i landet, nemlig centralvarmeanlæg med vandgennemstrømmede radiatorer.

Man kan også benytte sig af grus og sten som lagermedium, specielt i forbindelse med luft-solvarmeanlæg. Grus og sten er særdeles billige materialer og varmeoverførslen mellem sten og luft er ganske effektiv, når stenene er af en passende størrelse (stendiameter på 2-5 cm synes at være optimale). Herved sikres der nemlig en god passage for luften, når energien skal transporteres ind og ud af lageret, samtidig med at den samlede stenoverflade er stor. Af tabel 2.1 fremgår, at et stenlager vil fylde 2-3 gange så meget som et vandlager, når det skal kunne rumme den samme energimængde.

Faseændringslagre

Interessante muligheder for varmelagring frembydes af visse materialer, der undergår en faseændring fra fast til flydende tilstandsform ved en temperatur, der kun ligger lidt over den ønskede forbrugstemperatur. Ved denne form for oplagring skal temperaturniveauet stort set ikke hæves for at lagre

varmen, og derfor bliver varmetabet i reglen langt mindre end fra et varmekyldelager (jævnfør afsnit 2.3).

Adskillige kriterier må dog være opfyldt for at denne lagringsmulighed bliver attraktiv. Faseændringen må således være ledsaget af en høj, frigjort smeltevarme, og må kunne foregå mange gange, uden at materialets lagringsegenskaber forringes nævneværdigt. Stoffet må heller ikke være stærkt korroderende eller giftigt. Endelig må dets pris naturligvis også være rimelig. Alt i alt stilles der således ganske mange krav til et stof af denne type. Disse krav har det hidtil været ret vanskeligt at opfylde i tilstrækkeligt omfang.

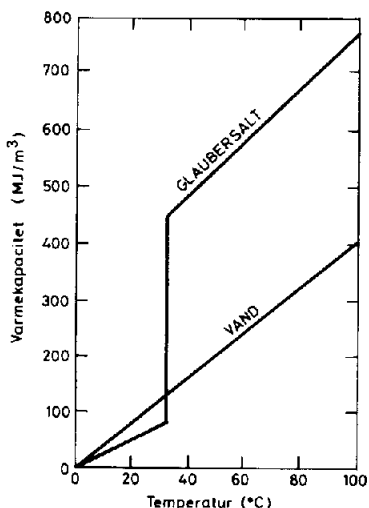
Størst forventning er der nok knyttet til de såkaldte salthydrater, som består af et salt, der indeholder en vis mængde krystalvand. Det mest kendte af disse stoffer er glaubersalt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Som formelen angiver vil glaubersalt i fast form have ikke mindre end 10 mol H_2O knyttet til hvert mol Na_2SO_4 . Smeltepunktet T_s ligger ved 32°C og smeltevarmen L er på ikke mindre end 253 kJ/kg . Både over og under smeltepunktet fungerer glaubersalt som et stof med konstant specific varmekapacitet, nemlig $c_\ell^{\text{før}} = 1,93 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ og $c_\ell^{\text{efter}} = 3,55 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$. Når mediet har opnået en temperatur T_ℓ , der ligger over T_s , er dets termiske energiindhold E_ℓ givet ved*:

$$E_\ell = m_\ell \cdot c_\ell^{\text{før}} \cdot (T_s - T_{\text{omg}}) + m_\ell \cdot L + m_\ell \cdot c_\ell^{\text{efter}} \cdot (T_\ell - T_s) \quad (2.2)$$

Det er interessant at foretage en grafisk afbildning af varmekapaciteten af henholdsvis 1 m^3 vand og 1 m^3 glaubersalt som funktion af lagertemperaturen T_ℓ . Dette er gjort i figur 2.3, hvor omgivelsernes temperatur er sat til 0°C .

Man bemærker straks, at der optræder et spring i kurven for glaubersalt ved $T_\ell = T_s$. Man er således i stand til at lagre store mængder termisk energi ved et lavt temperatur-niveau. Herved bliver varmetabet meget beskedent, da dette er proportionalt med $(T_\ell - T_{\text{omg}})$, jfr. ligning (2.4) side 31.

(*) Vi har valgt at sætte det termiske energiindhold til nul, når lagermediets temperatur er lig med T_{omg} .

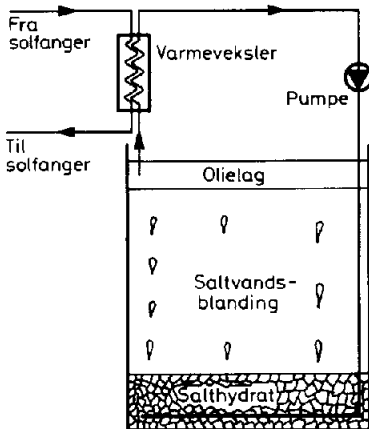


Figur 2.3 Termisk energiindhold i 1 m³ vand og i 1 m³ glaubersalt. (Furbo og Svendsen, 1977).

Endnu er glaubersalt ikke blevet anvendt som termisk energilager i særlig stor udstrækning, da der er betydelige problemer forbundet hermed. Det største problem er knyttet til salthydratets inkongruente smeltemåde. Hermed menes, at saltopløseligheden ikke er tilstrækkelig stor til, at al Na₂SO₄ kan opløses i sit eget krystalvand. Ved smeltning af stoffet dannes der følgelig et uopløst bundfald i lagertanken, og dette bundfald vokser for hver smelte/størkne cyklus. I løbet af kort tid vil lageret derfor stort set være holdt op med at fungere som et faseændringslager.

På Laboratoriet for Varmeisolering ved DtH har man gennem flere år arbejdet meget intensivt med dette problem, og man har prøvet adskillige metoder til forhindring af bundfaldsdannelse. Princippet i disse metoder er altid, at man tilsætter lidt ekstra vand, således at al saltet kan opløses, og desuden sørges der for én eller anden form for omrøring i mediet. Som eksempel viser vi i figur 2.4 en konkret lagerudformning, hvor man benytter olie som varmoveføringsmiddel. Olien tilføres varmelageret med glaubersaltopløsningen gennem et system af dyser, der er placeret i

bunden af beholderen. På grund af massefyldeforskelle stiger olien til vejrs og afgiver enten varme til eller modtager varme fra glaubersaltet. Pointen i denne metode er, at den smule omrøring i mediet, som forårsages af de opboblende oliedråber, tilsyneladende er nok til at forhindre dannelse af bundfald.

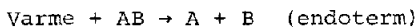


Figur 2.4 Skitse af faseændringslager med salthydrat som lagermedium.

Kemisk reaktionsvarme

I løbet af det sidste par år er der dukket nye spændende muligheder op for lagring af termisk energi, nemlig ved at "binde" energien som kemisk reaktionsvarme indtil der er behov for den. Ingen af disse metoder er endnu færdigudviklede, ligesom det endnu er uafklaret, hvordan økonomien vil blive, når og hvis de bliver markedsført.

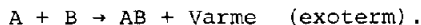
På generel form kan vi beskrive energilagringsprincippet på følgende måde: en kemisk forbindelse AB tilføres varme, hvorved den spaltes i reaktionsprodukterne A og B:



Ved at opbevare A og B hver for sig kan termisk energi derfor lagres tabsfrit over længere tid. Når der atter er brug for energien bringes de to stoffer til at reagere med hinanden, og den kemiske energi frigøres som varme, samtidig

TERMISK ENERGILAGRING

med at udgangsstoffet atter dannes:

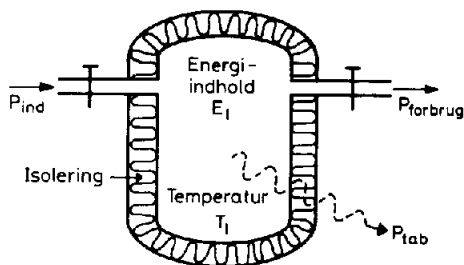


Kemisk energilagring er behandlet udførligt i kapitel 5.

2.3 Lagerligningen

Termiske energilagre kan være ret så forskellige m.h.t. størrelse og m.h.t. lagermedium, men den grundlæggende fysik er under alle omstændigheder den samme. Den såkaldte lagerligning udtrykker nemlig blot den almengyldige fysiske lov, at den samlede energi er bevaret i et isoleret fysisk system uanset hvilke processer, der i øvrigt forløber inden for systemet.

Figur 2.5 forestiller et termisk energilager. Figuren leder måske tanken hen på en varmtvandsbeholder, der jo er prototypen på et termisk energilager, men det må understreges, at den følgende beskrivelse er af mere almen karakter.



Figur 2.5 Skitse af et termisk energilager.

Vi forestiller os nu, at lageret modtager energi fra én eller anden ydre kilde, og at effekten ved denne påfyldning er P_{ind} ; samtidig tappes der en vis effekt $P_{forbrug}$ til nyttig varme, medens effekten P_{tab} går til spilde (nemlig til unyttig varme i lagertankens omgivelser). Idet det betragtede fysiske system består af lagertank + omgivelser

+ energikilder + forbrugssted, får vi for energibalancen i et lille tidsrum Δt :

$$\Delta E_{\ell} = (P_{\text{ind}} - P_{\text{forbrug}} - P_{\text{tab}}) \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

hvor ΔE_{ℓ} er tilvæksten i lagermediets termiske energi. E_{ℓ} er givet ved formel (2.1) for et varmfyldelager og ved formel (2.2) for et faseændringslager. Ligning (2.3) er den fundamentale lagerligning, som vi vil benytte i det følgende. Det er klart, at ligningen må suppleres med oplysninger om, hvorledes P_{ind} , P_{forbrug} og P_{tab} varierer med tiden. For så vidt angår P_{ind} og P_{forbrug} , vil disse størrelser naturligvis helt og holdent afhænge af, hvilken konkret sammenhæng lageret indgår i (jævnfør de praktiske eksempler i næste afsnit). Derimod vil vi i reglen kunne beskrive varmetabsleddet P_{tab} ved hjælp af Fouriers varmelednings-ligning, som siger følgende:

$$P_{\text{tab}} = A_{\ell} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}}) \quad (2.4a)$$

hvor

A_{ℓ} = lagertankens overfladeareal (m^2)

λ = isoleringens varmeledningsevne ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)

d = isoleringens tykkelse (m)

T_{ℓ} = lagermediets temperatur (K)

T_{omg} = omgivelsernes temperatur (K)

Af udtrykket for varmetabet fremgår, hvorfor det er ufordeleagtigt at have en lagertemperatur, der er meget højere end forbrugstemperaturen. Hvis man kan få faseændringslagre baseret på glaubersalt (smeltepunkt ved 32°C) til at fungere tilfredsstillende, vil sådanne lagre som følge af det ringe varmetab være yderst interessante.

I det følgende vil vi skrive ligning (2.4a) på formen

$$P_{\text{tab}} = A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}}) \quad (2.4)$$

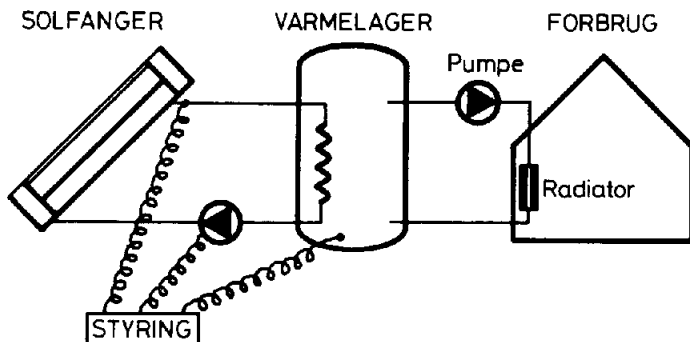
hvor vi har indført

U_{ℓ} = lagertankens varmetabskoefficient ($W/(m^2 \cdot K)$)

ved den simple relation: $U_{\ell} = \frac{\lambda}{d}$.

2.4 Korttidslager til solvarmeanlæg

Et solvarmeanlæg til varmt brugsvand består i langt de fleste tilfælde af en mindre solfanger (5-12 m² er passende for et almindeligt énfamiliehus), en lagertank med vand (ca. 40-100 liter vand pr. m² solfanger) og et forbrugsstød bestående af radiatorer og varmtvandshaner.



Figur 2.6 De vigtigste komponenter i et solvarmeanlæg.

Væsken, der cirkulerer i det primære kredsløb mellem solfanger og lagertank, må ikke kunne fryse, da der i så fald vil være risiko for alvorlige frostsprængninger. I reglen benyttes derfor enten olie eller en vand-glykol blanding som solfangervæske. Denne optager varme i solfangeren (når solindstrålingen er tilstrækkelig stor), og afgiver den derpå til lagermediet ved at strømme igennem en varmeveksler i lagertanken. Vi gør her for simpelhedsskyld den antagelse, at varmeveksleren er 100% effektiv*, således at solfangervæsken bliver kølet helt ned til den fælles lagertemperatur T_{ℓ} i tanken. Indgangstemperaturen i solfangeren er altså også T_{ℓ} , hvis rørene er isoleret så godt, at vi

(*) I praksis er effektiviteten omkring 80-90%.

kan se bort fra det uundgåelige varmetab heri. Lad os nu under disse forudsætninger opstille en matematisk model for hele solvarmeanlæggets drift.

Vi starter ud fra lagerligningen (2.3), der ved hjælp af (2.1) og (2.4) kan skrives:

$$m_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot \Delta T_{\ell} = (P_{\text{ind}} - P_{\text{forbrug}} - A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}})) \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

hvor ΔT_{ℓ} er temperaturstigningen i lagertanken i tidsrummet Δt . For at kunne beregne hvorledes temperaturen (og dermed også det termiske energiindhold) varierer i løbet af f.eks. et døgn, må vi vide noget om P_{ind} og P_{forbrug} . Hvad angår P_{ind} , er det jo netop solfangerens nyttiggjorte effekt, der kan bestemmes, som forskellen mellem den absorberede effekt i solfangeren og solfangerens effekttab.

Man kan vise (se f.eks. (Bason og Nielsen, 1981) eller (Solvarme, 1980)), at solfangerligningen kan skrives således:

$$P_{\text{ind}} = F_R \cdot [A_S \cdot I \cdot (\tau\alpha) - A_S \cdot U_S \cdot (T_{\ell} - T_{\text{luft}})] \quad (2.6)$$

hvor

A_S = Solfangerens areal (m^2)

U_S = Solfangerens varmetabskoefficient ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

I = Solstrålingen pr. m^2 Solfanger (W/m^2)

τ = Den brøkdel af solstrålingen, som transmitteres gennem dækglasset

α = Den brøkdel af solstrålingen, som absorberes på absorberpladen

T_{luft} = Luftens temperatur udenfor solfangeren (K)

T_{ℓ} = Solfangervæskens indgangstemperatur = lagerets temperatur (K)

F_R = Korrektionsfaktor

Formlen (2.6) er let at gennemskue: det første led i den kantede parentes er netop den absorberede effekt på solfangerabsorberen, og det sidste led må naturligvis fortolkes som absorberens varmetab, såfremt hele absorberen er kølet ned til indgangstemperaturen T_{ℓ} (jfr. ligning 2.4).

TERMISK ENERGILAGRING

Parameteren F_R korrigerer for, at absorberpladens middeltemperatur i alle praktiske situationer vil være noget højere end T_ℓ . Det virkelige varmetab vil altså være større end $A_s \cdot U_s \cdot (T_\ell - T_{\text{luft}})$, og korrektionsfaktoren har således en værdi mellem 0 og 1.

Man må nu gøre sig klart, at A_s , τ , α , U_s og F_R er nogle konstanter, der karakteriserer solfangeren. Med en given solfanger til rådighed kan disse parametre betragtes som kendte størrelser; følgelig kan ligning (2.6) bruges til at forudsige solfangerens nyttige effektproduktion P_{ind} , såfremt man løbende måler I og T_{luft} .

Et praktisk eksempel

Vi betragter et solvarmeanlæg til delvis dækning af varmtvandsforbruget i et énfamiliehus. Anlægget består af en sydvendt solfanger (hældning 45°) og en lagertank. De relevante parametre er anført i tabel 2.2.

Parameter	Symbol	Talværdi
<u>Solfanger</u>		
Solfangerens areal	A_s	10 m ²
Transmissionsfaktor (1 lag glas)	τ	0,86
Absorptionsfaktor (sortmalet absorber)	α	0,95
Solfangerens varmetabskoefficient	U_s	7,5 W·m ⁻² ·K ⁻¹
F_R -faktoren (for en vækestrøm på ca. 1 liter pr minut pr m ² solfanger)	F_R	0,84
<u>Lager</u>		
Lagertankens overfladeareal	A_ℓ	6 m ²
Lagermediets masse (vand)	m_ℓ	1000 kg
Lagermediets spec.varmekapacitet	c_ℓ	4,2 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹ 1,16 Wh·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Lagertankens varmetabskoefficient	U_ℓ	0,50 W·m ⁻² ·K ⁻¹
Omgivelsernes temperatur (konstant)	T_{omg}	20°C

Tabel 2.2 Parameterværdier for modelsolvarmeanlæg.

Lad os nu antage, at lagertemperaturen er målt til at være 40°C kl. 6.00 på en bestemt dag, hvor den indstrålede sol-energi ($I \cdot \Delta t$) og luftens temperatur (T_{luft}) er målt time for time* i dagens løb. De målte værdier er anført i de to første søjler i tabel 2.3, mens søjle 3 viser et forbrug ($P_{\text{forbrug}} \cdot \Delta t$), der er nogenlunde typisk for en familie på fire personer, både hvad angår forbrugets størrelse og dets døgnvariation (jævnfør figur 2.2b). Energienheden Watt-timer (Wh), der er benyttet i tabel 2.4, er naturlig at benytte i denne og lignende sammenhænge. Måler vi nemlig I og P_{forbrug} i Watt (W), og vælger vi tidsintervaller $\Delta t = 1$ time, har man jo umiddelbart $I \cdot \Delta t$ og $P_{\text{forbrug}} \cdot \Delta t$ i enheden Wh.

Ved hjælp af parameterverdierne i tabel 2.2 samt data for solindstråling og forbrug i tabel 2.3, kan vi nu ud fra ligningerne (2.5) og (2.6) finde lagertemperaturen til et vilkårligt tidspunkt.

Kaldes temperaturen ved en times begyndelse for $T_{\ell, \text{gl}}$ og ved timens slutning for $T_{\ell, \text{ny}}$, kan vi få en god bestemmelse af $T_{\ell, \text{ny}}$ ud fra $T_{\ell, \text{gl}}$ ved at omskrive (2.5) og (2.6) på følgende måde:

$$m_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot (T_{\ell, \text{ny}} - T_{\ell, \text{gl}}) = P_{\text{ind}} \cdot \Delta t - P_{\text{forbrug}} \cdot \Delta t - P_{\text{tab}} \cdot \Delta t \quad (2.7a)$$

hvor

$$P_{\text{ind}} \cdot \Delta t = F_{\text{R}} \cdot A_{\text{S}} \cdot [(\tau \alpha) \cdot (I \cdot \Delta t) - U_{\text{S}} \cdot \Delta t \cdot (T_{\ell, \text{gl}} - T_{\text{luft}})] \quad (2.7b)$$

$$P_{\text{tab}} \cdot \Delta t = A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell, \text{gl}} - T_{\text{omg}}) \cdot \Delta t \quad (2.7c)$$

og

$$P_{\text{forbrug}} \cdot \Delta t = \text{værdierne i tabel 2.3 søjle 4.} \quad (2.7d)$$

(*)

Den øjeblikkelige solindstråling på en orienteret flade kan måles med et pyranometer. Et billigt pyranometer kan bl.a. købes hos Frank Bason, Linåbakken 13, 8600 Silkeborg. Dansk vejledning medfølger.

TERMISK ENERGILAGRING

Indsættes talværdier finder vi altså $T_{l,ny}$, og denne kan derpå benyttes som udgangspunkt for en ny numerisk beregning, der giver os lagertemperaturen efter yderligere 1 time etc., etc. Ved at gennemføre disse lidt omstændige, men i princippet simple beregninger, finder man resultaterne i tabel 2.3, søjle 6 og 7. Vi henviser i denne forbindelse til opgave 2.3.

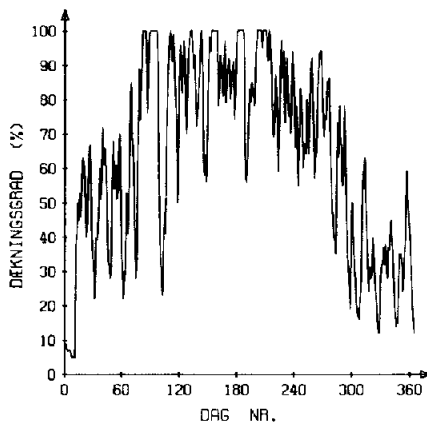
Tidsrum	MÅLTE VÆRDIER			BEREGNEDE VÆRDIER		
	T_{luft} (°C)	$A_s \cdot I \cdot \Delta t$ (Wh)	$P_{forbrug} \cdot \Delta t$ (Wh)	$P_{ind} \cdot \Delta t$ (Wh)	$T_{l,gl}$ (°C)	$T_{l,ny}$ (°C)
6-7	- 1	0	750	0	40,0	39,3
7-8	0	0	750	0	39,3	38,6
8-9	1	2300	750	0	38,6	37,9
9-10	3	3830	750	437	37,9	37,6
10-11	6	6030	250	2158	37,6	39,1
11-12	10	8500	250	4006	39,1	42,4
12-13	10	8700	250	3944	42,4	45,5
13-14	8	7670	250	2914	45,5	47,7
14-15	8	6080	750	1618	47,7	48,5
15-16	6	3940	750	39	48,5	47,8
16-17	4	0	750	0	47,8	47,0
17-18	1	0	750	0	47,0	46,3

Tabel 2.3 Eksempel på beregning af hele solvarmeanlægets opførsel fra time til time.

Simulering af solvarmeanlæg med EDB

Det er nu demonstreret, at vi kan simulere et solvarmeanlægs drift ved hjælp af solfangerligningen (2.6), lagerligningen (2.5) samt ligninger for forbrug og solindfald som funktion af tiden. Regningerne bliver naturligvis temmelig omfattende, hvis vi ønsker, at simuleringen skal strække sig over længere tidsrum - f.eks. 1 år - men i princippet kan vi bære os ad som i ovenstående eksempel.

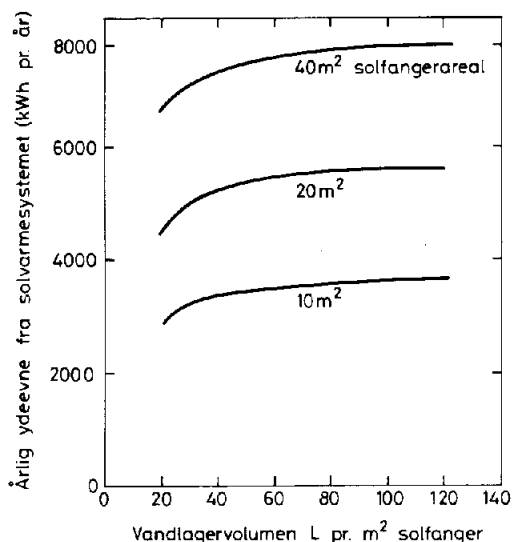
På Laboratoriet for Varmeisolering ved DtH har man udviklet et EDB-program således, at det nødvendige beregningsarbejde kan foretages meget hurtigt. Programmet skal naturligvis have oplysninger om (1) varmebehovet i det hus, der skal forsynes med solvarme, (2) solvarmesystemets anlægsparametre (areal, hældning, etc.) og endelig (3) vejr situationen time for time gennem et helt år (f.eks. fra en meteorologisk målestation). På grundlag af disse oplysninger kan EDB-programmet nu følge solvarmeanlæggets drift fra time til time og skrive alle ønskede oplysninger ud til brugeren. Som et eksempel på en detaljeret EDB-simulering viser vi i figur 2.7 for hver dag i året, hvor stor dækningsgraden er (d.v.s. den brøkdel af varmtvandsbehovet, der vil kunne dækkes af solvarme). Beregningerne vedrører et varmtvandsanlæg, der er næsten identisk med det, vi betragtede i eksemplet ovenfor.



Figur 2.7 Den beregnede dækningsgrad for hver dag i året for et solvarmeanlæg til varmt brugsvand. Anlægsparametre som i tabel 2.3 (Solvarme, 1980).

Konklusion. På grundlag af EDB-simulering findes altså, at det beskrevne anlæg (hvor lagertanken er af størrelsesordenen 80-100 liter vand pr. m^2 solfanger) vil udvise en årlig dækningsgrad på omkring 65%. Men det fremgår også, at medens dækningsgraden er omkring 90-100% i sommermånederne, er den

til gengæld meget beskeden i vintermånederne. Ydermere fremgår det af figuren, at det ikke vil hjælpe særlig meget at forøge lagertankens størrelse indenfor selv ret vide grænser. En betydelig større lagertank vil jo praktisk taget ikke kunne øge dækningsgraden i sommermånederne, og det vil under alle omstændigheder være urealistisk at håbe på fuld dækning i vintermånederne (se dog afsnit 2.6). Mere udførlige EDB-beregninger bekræfter, at et solvarmesystems ydeevne næsten ikke forbedres ved forøgelse af lagervolumenet, når blot volumenet er over en vis kritisk størrelse. Dette ses af figur 2.8, der viser, at kurverne over et solvarmeanlægs årlige ydelse bliver næsten vandrette, når lagerets størrelse overstiger 40-50 liter/m² solfanger.



Figur 2.8 Beregnet årlig ydelse for solvarmeanlæg til delvis dækning af rumopvarmning og brugsvandopvarmning med forskellige solfangerarealer og vandlagervolumener. (Furbo, 1979).

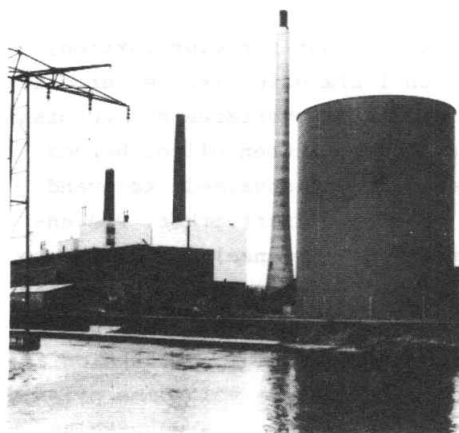
2.5 Korttidslagre i fjernvarmesystemer

På et nyt kraftværk, der alene er beregnet for elproduktion, omdannes omkring 40% af energien i brændslet (kul eller olie) til elektrisk energi, medens resten må overføres som termisk energi til kølevandet. Kølevandstemperaturen bliver herved omkring 25°C. Før energikrisen blev det opvarmede kølevand ledet direkte ud i havet ved de fleste kraftværker. Ved enkelte kraftværker (f.eks. Fynsværket i Odense) udnyttede man dog energien i kølevandet i fjernvarmeforsyningen. For at få en højere temperatur på kølevandet er Fynsværkets elproduktion reduceret noget*. Denne form for samtidig produktion af el og varme kaldes kraft/varmedrift. Med de voldsomme prisstigninger på brændsel er der fulgt en stigende udnyttelse af det varme kølevand i fjernvarmeforsyninger. Ifølge Energiplan 81 skal således ikke mindre end 40% af Danmarks husholdninger i 1995 have deres opvarmningsbehov dækket via kraft/varmeproduktion.

Et problem ved kraft/varme er, at elbehov og varmebehov ikke følger helt den samme døgnrytme. Vi så på figur 1.2, at elbehovet varierer med ca. en faktor 2 i døgnets løb, medens varmebehovet (jfr. figur 2.2(b)) ikke svinger nær så voldsomt. For at kraftværket skal kunne dække spidsbelastningerne i elforbruget må de producere store mængder elektricitet omkring spidslastperioderne. Herved dannes der tilsvarende store mængder kølevand, hvoraf kun en mindre del umiddelbart kan udnyttes til varmeforsyning. Et varmelager for 60-90°C varmt kølevand vil derfor være hensigtsmæssigt, da det herved er muligt at flytte varmeproduktionen til et tidspunkt, hvor der ikke er spidsbelastning på elsidens.

I praksis udformes et varmelager i større målestok som en isoleret ståltank af form som en olietank. Gennem et pumpe-system kan det oplagrede varme vand pumpes ud i fjernvarmesystemet, når der er behov for det, og varmt vand kan pumpes fra værket over i lagerbeholderen (varmeakkumulatoren).

(*) I stedet for 40% bliver kun ca. 35% af brændslets energi til elektrisk energi.



Figur 2.9 Varmeakkumulator til fjernvarme på Fynsværket i Odense. Billedet er stillet til rådighed af Fynsværket I/S.

På Fynsværket i Odense blev der i 1979 installeret en varmeakkumulator på 12000 m^3 . Akkumulatoren er en 32 m høj stål-tank, der er isoleret med 25 cm mineraluld; den indvendige diameter er 23 m. Med en afkøling af det lagrede vand på 30°C , nemlig fra ca. 90°C til ca. 60°C , er lagerets udnyttelige termiske energiindhold givet ved:

$$\begin{aligned} E_{\ell} &= m_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot \Delta T_{\ell} \\ &= 12000 \text{ m}^3 \cdot 4,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \cdot 30^\circ\text{K} \\ &= 1,5 \text{ TJ (eller 420 MWh)} \end{aligned} \quad (2.8)$$

hvilket er tilstrækkeligt til at klare varmforsyningen i området i ca. 1 time om vinteren. Når varmeproduktionen i dette tidsrum er koblet ud på elværket, kan elproduktionen øges med 40 MW. Varmeakkumulatoren kan således på elsidens erstatte en kraftværksenhed på 40 MW. Økonomisk set er en tilgang på 40 MW elektrisk effekt for en udgift på 10 mill. kr. - nemlig det, det kostede at opføre beholderen med rørledninger og pumper - en god forretning. Normalt må man investere mere end det femdobbelte for ny eleffekt af denne størrelse.

I mindre fjernvarmeforsyninger, hvor der inden for forsyningsområdet findes større mængder spildvarme fra industrian-

læg, vil man med fordel kunne etablere korttidsvarmelagre. Herved kan man opnå en bedre tilpasning mellem varmereproduktion og varmebehov, samtidig med at forsyningssikkerheden øges.

2.6 Sæsonlagre*

Vandmagasin. De hidtil omtalte eksempler på termiske energilagre har været deciderede korttidslagre - altså lagre, hvori energien kan gemmes i nogle få timer eller døgn. I teorien kan det godt lade sig gøre at gemme solvarme - f.eks. i meget store velisolerede vandtanke - fra sommer til vinter, men det er simpelthen for dyrt, hvis det skal ske i forbindelse med almindelige énfamilies solvarmeanlæg.

Der er netop i disse år en række interessante forsøg i gang, som skal godtgøre, om sæsonlagring er praktisk og økonomisk forsvarlig for store kollektive solvarmeanlæg, altså solvarmeanlæg, der er fælles for et større antal beboelser. Det mest omtalte projekt af denne art er nok det svenske Linköping-projekt (figur 2.10). At det i hvert fald teoretisk er en fordel at gøre varmelageret stort, er let at indse. Betragt en helt fyldt, kugleformet lagertank med radius R . Med betegnelserne fra afsnit 2.2-2.3 gælder der for lagerets termiske energi:

$$E_{\ell} = \frac{4\pi \cdot R^3}{3} \cdot \rho_{\ell} \cdot c_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}}) \quad (2.9)$$

idet vi definerer lagerets termiske energi til at være 0, når lagertemperaturen er lig med omgivelsernes temperatur. Endvidere er lagerets effekttab:

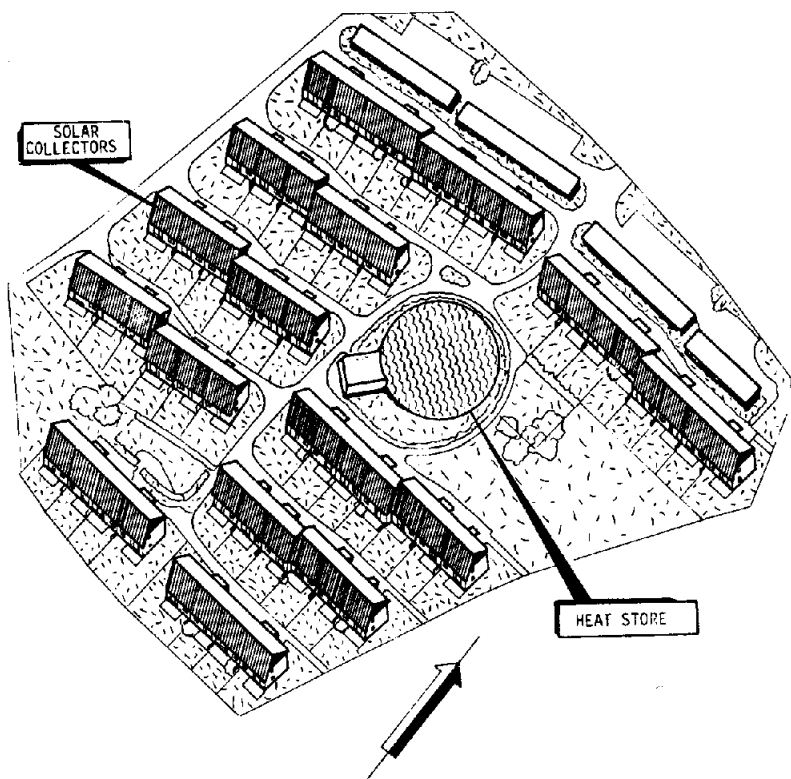
$$P_{\text{tab}} = 4\pi \cdot R^2 \cdot U_{\ell} \cdot (T_{\ell} - T_{\text{omg}}) \quad (2.10)$$

(*) Foruden i dette afsnit behandles sæsonlagre i øvelse I.

Forholdet

$$\frac{P_{\text{tab}}}{E_{\ell}} = \frac{3 \cdot U_{\ell}}{\rho_{\ell} \cdot c_{\ell}} \cdot \frac{1}{R} \quad (2.11)$$

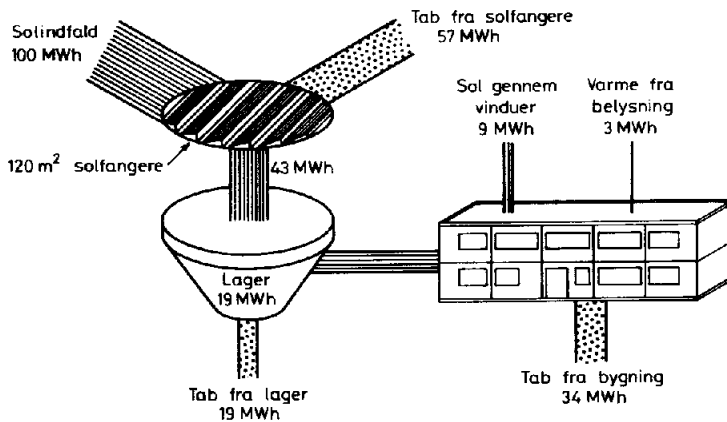
angiver derfor den brøkdelen af lagerets energiindhold, der tabes pr. tidsenhed. Vi bemærker, at denne brøkdelen er omvendt proportional med radius R . Det procentvise varmetab



Figur 2.10 55 rækkehuse ved Linköping i Sverige opvarmes næsten fuldstændig af 2875 m² solfangere på husenes syd-vendte tagflader. Lagertanken rummer omtrent 10.000 m³ vand, der opvarmes fra 20 til 70°C. Fem varmepumper på i alt 186 kW elektrisk effekt sikrer den ønskede temperatur på såvel det varme vand som rumopvarmningsvandet. Anlægget blev taget i brug i maj 1980. (Norbäck og Hallenberg, 1980).

kan således halveres ved at forøge tankens radius med en faktor 2. Fordelen ved større tanke træder tydeligere frem ved at se på f.eks. en tank med $R=1$ m og et fællesanlæg med tankradius på 10 m. Den store lagertank bliver omtrent 10 gange bedre til at "holde på varmen" end den lille tank.

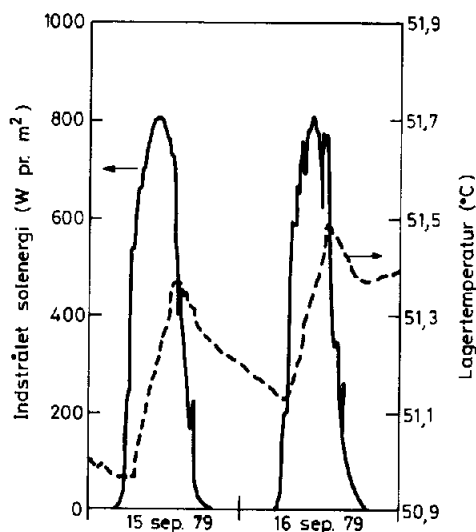
Forud for bygningen af anlægget ved Linköping blev der etableret et forsøgsanlæg hos den svenske forskningsinstitution Studsvik Energiteknik.



Figur 2.11 Solvarmecentralen i Studsvik. Vandvarmelageret rummer 640 m³ og er 6 m dybt. Lageret er i bunden isoleret med mineraluld og i toppen med polyurethanskum. Figuren viser energibalancen for 1 år. Det totale varmebehov er 34 MWh, heraf tilføres 2 MWh som elektricitet til belysning, 9 MWh som solenergi via tag og vinduer og 23 MWh fra solvarmecentralen (Roseen og Perers, 1980).

Anlægget, der er vist i figur 2.11, forsyner et kontorhus med varme. Bemærk, at solfangerne er placeret på vandvarmelagerets låg, hvilket giver korte rørføringer og dermed også små varmetab fra disse rør. Bemærk også varmelagerets specielle udformning, der er valgt med henblik på at opnå en god temperaturfordeling i lageret, altså vand med høj temperatur for oven og med lav temperatur for neden. Dette er naturligvis ønskeligt, fordi man i så fald kan tappe af det varme vand til husets forbrug og samtidig sende koldt vand

fra bunden gennem solfangerne. (Det fremgår af solfangerligningen (2.6), at solfangerens udbytte er størst, når indgangstemperaturen er så lav som mulig).



Figur 2.12 Indstrålet solenergi (fuldt optrukket kurve) og middeltemperatur i lageret (stiplet kurve) på forsøgsanlægget i Studsvik under opladningen i september 1979. (Roseen og Perers, 1980).

Det vil sandsynligvis vise sig, at solvarmeanlæg, der sigter mod at dække behovet for termisk energi fuldstændigt, bliver uøkonomiske selv med høje priser på andre opvarmningsformer. Fremtidens solvarmeværker vil derfor nok inkludere en supplerende varmekilde, der dækker en del af opvarmningsbehovet i vintermånederne.

Jordmagasin. For at skaffe tilstrækkeligt billige sæsonlagre har flere foreslået, at man - fremfor at bruge en ret dyr betontank til varmt vand - anvender jorden som lagermedium. Jorden ned til en vis dybde opvarmes om sommeren og bringes til at afgive varmen om vinteren. Jord - evt. ler eller sand - isolerer nemlig nogenlunde samtidig med, at det har en ret god varmekapacitet. Pr. rumfangsenhed er denne var-

mekapacitet fra $1/3$ til $1/2$ af vands, jfr. tabel 2.1. Via et antal nedgravede eller nedborede varmevekslerrør med vand som varmbærende medium overføres varmen til og fra jorden, og isolering er kun nødvendig over jordmagasinet, dvs. lige under jordoverfladen. Et jordmagasin må naturligvis have en vis mindste-størrelse for at det årlige tab vil være tilstrækkeligt lille i forhold til den lagrede termiske energi, jfr. ligning (2.11). For et halvkugleformet magasin skal radius være omkring 10 m.

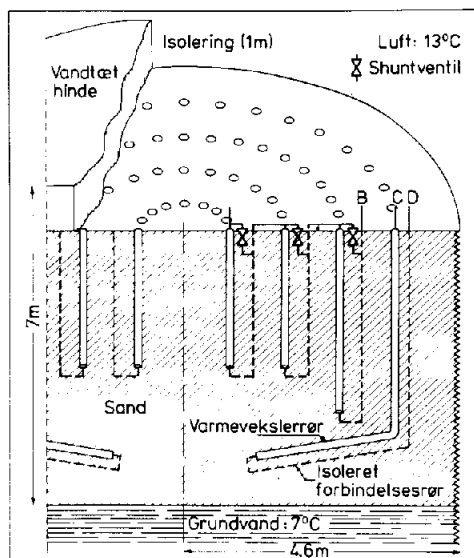
På Forsøgsanlæg RISØ (Rathmann, 1977) har man foretaget en simulering af et mindre jordlayers opførsel på årsbasis. I modellen indgår jordlageret i et solvarmesystem, der er installeret i et stort parcelhus med 108 GJ årligt varme-forbrug, heraf $1/3$ til varmt brugsvand. Solfangeren er på 65 m^2 , sydvendt og har en hældning på 65° i forhold til vandret.

Beregningerne blev gjort under den forudsætning, at magsintemperaturen ved årets begyndelse (1. april) var den samme som ved årets slutning (næstfølgende 1. april). De benyttede meteorologiske data svarer til et typisk dansk år.

Modellen af jordmagasinet er vist i figur 2.13. Ved at vælge dette magasin som eksempel er der gjort både optimistiske og pessimistiske forudsætninger. Magasinet er ret lille, fordi det er tænkt anvendt i et forsøgsanlæg, hvor kun varmeunderskuddet i den første halvdel af vinteren skal dækkes ved hjælp af sæsonlagring.

Etableringen tænkes at ske i tørt sand, der er en virkelig god varmeisolator. Til gengæld regnes der med let strømmende grundvand, der fjerner al den varme, der lækker nedad fra magasinet. Stillestående eller meget dybtliggende grundvand vil naturligvis bevirke, at magasinets evne til at holde på varmen bliver betydeligt forbedret.

For at mindske varmetabene mest muligt er der på flere måder søgt opnået en stigende temperatur i retning af magasinets midte og top. F.eks. går de midterste rørkranse ikke så dybt ned som de yderste, og den yderste rørkrans benyttes til at opfange og nyttiggøre så meget som muligt af den varme, der lækker ud fra magasinets centrale del. På grund af den lave re temperatur udnyttes denne varme til forvarmning af brugsvand.



Figur 2.13 viser et snit gennem et jordmagasin med fire rørkranse. Under energitilførsel ledes varmt vand fra solfangeren ind ved A og fra B tilbage til denne. Ved energiudtag ledes varmt vand fra A til centralvarmesystemet og retur til B (Rathmann, 1977).

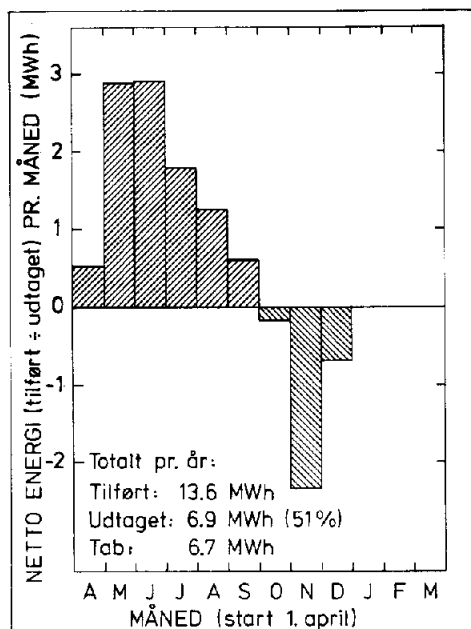
Udover at være isoleret er magasinet foroven vandtæt overdækket, for at nedtrængende regnvand ikke skal gennembløde isolationen eller transportere varmen bort.

Resultatet af beregningseksemplet er vist i figur 2.14. De lave nettoenergier for juli og august sammenlignet med maj skyldes solfangerens dalende effektivitet med stigende magasintemperatur.

De viste nettoenergier sandsynliggør, at solenergisystemet inklusive jordmagasin kan dække husets varmebehov fuldstændigt i månederne april til og med oktober, med 70% i november og med kun 15% i december. Fra 1. januar til 1. april antages jordmagasinet frakoblet.

Temperaturen af det forvarmede brugsvand svingende mellem 22°C og 48°C, og temperaturen på magasinets varmeste sted nåede i august op på 95°C.

Ud fra ovenstående eksempel har man beregnet, at med et lignende magasin med en varmekapacitet 2-2,5 gange så stor (dvs. med en radius på 7-8 m) vil det årlige varmebehov kunne dækkes.



Figur 2.14 viser energiregnskabet for jordlageret. Energiudtag til forvarmning af brugsvand er medregnet i de månedlige nettoenergier. På årsbasis udgør forvarmningsenergien 48% af totaludtaget. (Rathmann, 1977).

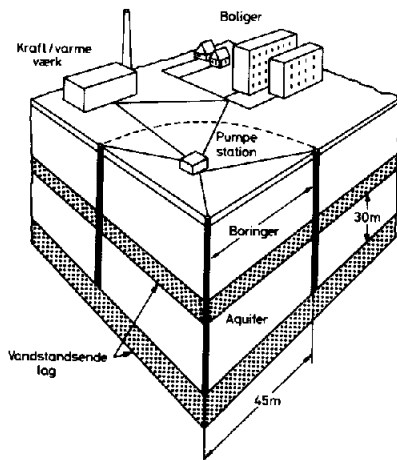
De økonomiske vurderinger af et sådant lager ser forholdsvis lovende ud, men før der er gennemført realistiske forsøg, er det ikke muligt at sige noget præcist om fremtidsperspektiverne for jordmagasiner i Danmark.

Akvifer. Solvarme, spildvarme fra industri og evt. overskudsvarme fra sommerproduktionen på et kraft/varmeværk kan i princippet bruges til at dække efterårets og vinterens varmebehov i en fjernvarmeforsyning. En nødvendig forudsætning er, at man råder over et meget stort lager svarende til et vandvolumen på 100.000 m³ eller mere. En mulig lagringsmetode, består i at lagre varmt vand i porøse lag i undergrunden i en dybde omkring 10-20 m, hvor grundvandsstrømninger er begrænsede. En sådan geologisk formation kaldes en akvifer, og man er i de seneste år begyndt at interessere sig meget for netop den slags formationer.

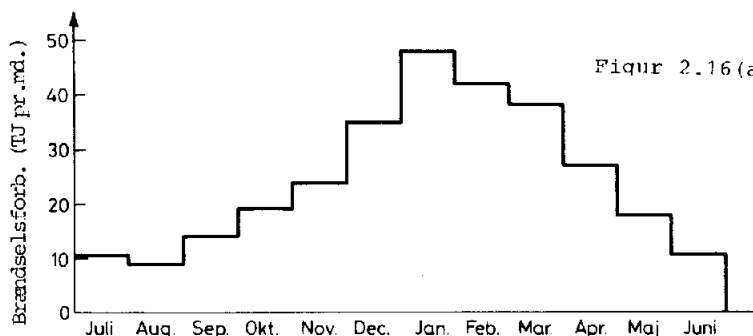
En model af varmeforsyningssystemet er vist i figur 2.15. Lagringsmetoden bygger på, at varmt vand i perioder med overskud pumpes ned i centrum af de vandmættede sandlag i undergrunden, hvor den faste porøse struktur anvendes som varmeakkumulator. Når der er behov for varme fra lageret, pumpes

vand op dels fra bunden af centrumsboringen dels fra randboringer. I et samarbejde mellem Forsøgsanlæg RISØ, Laboratoriet for Energiteknik ved DTH og Danmarks Geologiske Undersøgelser er et forsøgsanlæg under opbygning i forbindelse med Hørsholm fjernvarmeforsyning.

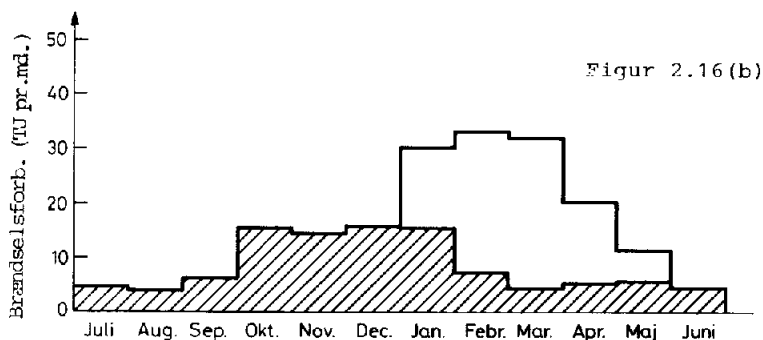
Betydningen af et større varmelager i en fjernvarmeforsyning fremgår af et modelstudie af Assens udført af Laboratoriet for Energiforskning ved Odense Universitet (J. Jensen m.fl., 1981). I en undersøgt forsyningsmodel udnyttes solvarme (20.000 m² solfangerpanel) og spildvarme fra Assens Sukkerfabrik, der er i drift hvert år fra begyndelsen af oktober til jul. Desuden indgår der en traditionel fjernvarme-central. Resultaterne fremgår af figur 2.16(a) og (b).



Figur 2.15 Model af varmeforsyningssystem med akviferlager. Formationen består af et sandlag (akuifer), der er begrænset opadtil og nedadtil af vandstandsende lerlag. Varmt vand pumpes gennem centerbrønden ud i sandlaget. (Reffstrup, 1980).



Figur 2.16(a)



Figur 2.16 Brændselsforbrug i Assens Fjernvarme for to forskellige forsyningsmodeller.

- (a) Kun sædvanlig fjernvarmekedel.
 (b) Solvarme, spildvarme og brændselsfyret varmepumpe, suppleret med varme fra fjernvarmekedel, når det er nødvendigt. Brændselsforbrug i varmepumpe vises skraveret, og brændselsforbrug i kedel vises uskraveret.

2.7 Opgaver

1. Varmeledning og isolering

Vi skal i denne opgave benytte relationen (2.4a), der omformes til

$$\frac{P_{\text{tab}}}{A_{\ell}} = \lambda \cdot \frac{T_{\ell} - T_{\text{omg}}}{d}$$

Ligningen udtrykker, at varmestrømmen pr. arealenhed (den termiske flux) gennem et materiale med tykkelse d er proportional med temperaturfaldet $T_{\ell} - T_{\text{omg}}$ og omvendt proportional med tykkelsen d . Proportionalitetsfaktoren er materialets varmeledningsevne λ .

Beregn ud fra værdierne i tabel 2.4 den termiske flux gennem 0,30 m mineraluld, henholdsvis 1,00 m beton. Sæt temperaturen aflageret til 80°C og omgivelsernes temperatur til 10°C . Hvor tykt et lag a) mineraluld, b) leca-blokke, c) beton giver samme isoleringsevne som 1,00 m tørt sand?

TERMISK ENERGILAGRING

Stof	Varmeledningsevne ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$)
sand (tørt, vådt)	0,4-1,4
sandholdig jord (tør, våd)	2,3-3,5
mineraluld	0,04
polyurethanskum	0,04
Leca (brændt ler)	0,12
træ	0,14-0,29
beton	1,75
glas	0,82

Tabel 2,4 Varmeledningsevne for udvalgte stoffer.

Ved angivelse af forskellige bygningselementers isoleringsevne taler man ofte om elementets k -værdi (varmetabskoefficient). Denne er defineret ved

$$k = \frac{\lambda}{d}$$

Beregn k -værdien af væg bestående af 10 cm beton og 10 cm mineraluld. Beregn effekttabet, når væggen er 50 m², inde-temperaturen 21°C og udetemperaturen 0°C, henholdsvis -12°C. (N.B. Bemærk, at væggenes k -værdi næsten udelukkende bestemmes af isoleringen!).

Optimal isoleringstykkelse. Med stigende energipriser kan det betale sig at isolere såvel boliger som varmelagre bedre. Prisen på mineraluld er for tiden (1982) ca. 215 kr./m³. Holdbarheden sætter vi til 15 år. Prisen pr. energienhed kalder vi p_e .

Hvor stor er den termiske flux gennem en betonmur med tykkelsen 0,1 m og areal 1 m², når vi sætter $T_{\text{inde}} = 20^\circ\text{C}$ og $T_{\text{ude}} = 0^\circ\text{C}$?

Muren forsynes nu med et lag mineraluld med tykkelsen d , og hele væggenes k -værdi sættes lig med mineraluldens k -værdi. Hvor stor bliver nu den termiske flux gennem væggen udtrykt ved hjælp af tykkelsen d ? Hvad bliver den nødvendige investering som funktion af d ? Hvor stor bliver den årlige besparelse udtrykt ved p_e og d ?

Vi tænker os nu, at vi fordeler investeringsudgifterne jævnt over de 15 år. Beregn den årlige fortjeneste ved at foretage denne isolering, og bestem den optimale isoleringstykkelser som funktion af energiprisen.

Energiprisen (elprisen) er for tiden ca. 75 Øre/kWh, men varierer en del fra egn til egn. Hvad er den optimale isoleringstykkelser i 1982?

2. Lille Solvarmeanlæg

- a) Eftersis resultaterne i tabel 2.4 - gerne ved hjælp af en computer eller en programmerbar lommeregner.
- b) Gennemfør tilsvarende beregninger med ændrede lagerparametre (tankens begyndelsestemperatur, omgivelsernes temperatur, tankens varmetabskoefficient og tankens størrelse). Men husk, det er tilrådeligt kun at ændre én parameter ad gangen!

3. Bestemmelse af et salthydrats smeltevarme

Med et almindeligt kalorimeter kan man nemt bestemme smeltevarmen for et salthydrat som fikkersalt ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), glaubersalt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) eller krystalsoda ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

Saltet fyldes i en lille plastflaske med et termometer og lukkes godt til. Endnu bedre er det at anbringe det i en plastpose, hvor luften er suget ud.

Saltet smeltes ved at beholderen anbringes i varmt vand, og når det er smeltet, køles det ned til lige over smeltepunktet.

Det smeltede salt føres hurtigt over i et kalorimeter med kendt varmekapacitet.

Man følger derefter temperaturen af både saltet og kalorimeter vandet indtil de er ens. Det er vigtigt at se efter, hvornår saltet udfældes.

Hvis vandmassen er ca. 5 gange så stor som saltmassen, fås en temperaturstigning på ca. 10°C .

Opstil kalorimeterligningen for forsøget og bliv klar over hvilke størrelser, der skal være kendte, og hvilke, der skal måles, for at man kan beregne smeltevarmen.

Sammenlign den fundne smeltevarme med en tabelværdi og forklar afvigelsen.

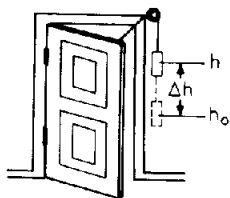
3. Mekanisk energilagring

3.1 Potentiel energi i tyngdefeltet

En simpel metode til lagring af energi består i at hæve en masse m højden Δh i tyngdefeltet. Herved lagres en energimængde af størrelsen

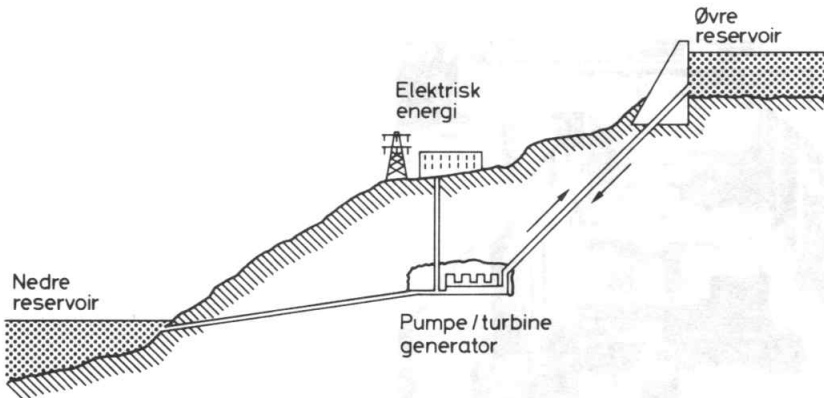
$$\Delta E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.1)$$

som potentiel energi i tyngdefeltet. Dette princip bruges mange steder i vore daglige omgivelser til lagring af små energimængder. Vi nøjes her med at henvise til figur 3.1, der illustrerer princippet.



Figur 3.1 Når døren åbnes, hæves loddet stykket Δh , og der lagres herved energien $m \cdot g \cdot \Delta h$ i tyngdefeltet. Denne energi benyttes derpå til at lukke døren igen.

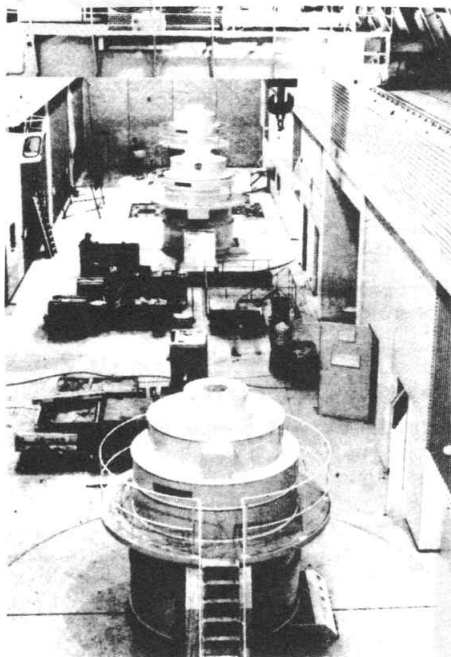
Lagring af store energimængder som potentiel energi bruges først og fremmest i forbindelse med elproduktion i pumpekraftværker. Figur 3.2 viser en principskitse af et sådant værk, medens 3.3 og 3.4 er fotografier fra anlægget Turlough Hill i Nordirland.



Figur 3.2 Principskitse af et pumpekraftværk. Bemærk de to vandreservoirer samt maskinrummet med pumpe/turbine og generator.



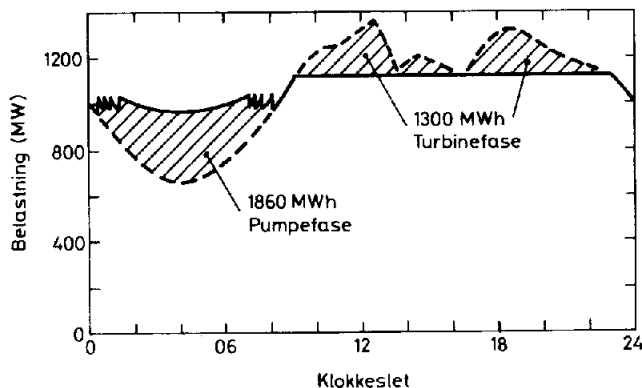
Figur 3.3 Billedet viser det kunstige øvre reservoir ved Turlough Hill i Nordirland. Reservoiret rummer $2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ vand og højdeforskellen mellem øvre og nedre reservoir er i middel 286 m. Det nedre reservoir består af søen Lough Nohanagan. (McMullan, 1976).



Figur 3.4 Fotografi fra det underjordiske maskinrum ved Turlough Hill inden anlægget var færdigbygget. Ialt er der 4 turbiner/pumper, der kan levere en samlet elektrisk effekt på 292 MW. (McMullan, 1976).

I perioder med lav elbelastning bruges kraftværkets turbiner som pumper til at pumpe vand fra nedre reservoir til øvre reservoir. Når der senere på døgnet bliver spidsbelastning på elnettet, kan den oplagrede potentielle energi så igen konverteres til elektrisk energi ved, at vandet af sig selv strømmer den modsatte vej. En indlysende fordel ved et sådant anlæg er, at elselskabets øvrige kraftværker - som enten kører på fossilt brændsel eller på uran - kun skal levere en nogenlunde konstant elproduktion over hele døgnet, jfr. figur 3.5.

For at kunne vurdere om det energimæssig set har kunnet betale sig at anlægge Turlough Hill pumpekraftværket, må vi sammenligne følgende to alternativer, A og B. A er den eksisterende situation, hvor Turlough Hill pumpekraftværket fungerer i samspil med elselskabets grundlastværker, der fungerer med en nyttevirkning på ca. 35%. B er derimod den tænkte situation, hvor Turlough Hill ikke fandtes. I så fald måtte de eksisterende grundlastværker i stedet suppleres



Figur 3.5 Den stiplede kurve viser den samlede belastning på det nordirske elnet som funktion af tidspunktet på døgnet. Den fuldt optrukne kurve viser den effekt, der leveres af områdets fossile kraftværker. Forskellen mellem disse to kurver viser den effekt, som Turlough Hill pumpekraftværket har på elforsyningen i Nordirland. (McMullan, 1976).

med spidslastværker, hvis nyttevirkning er betydeligt mindre, man regner normalt med ca. 25%.

Alternativ A: Af figur 3.5 fremgår, at der under den lave elbelastning om natten anvendes 1860 MWh elektrisk energi til pumpearbejde, mens der om dagen produceres en elektricitetsmængde på 1300 MWh. Men de forbrugte 1860 MWh elektrisk energi er jo produceret på grundlastværker, altså:

$$\text{Samlet brændselsforbrug: } \frac{1860 \text{ MWh} \cdot 100}{35} = 5.300 \text{ MWh}$$

Alternativ B: Her skulle man i stedet producere de nødvendige 1300 MWh elektrisk energi om dagen på spidslastværker:

$$\text{Samlet brændselsforbrug: } \frac{1300 \text{ MWh} \cdot 100}{25} = 5.200 \text{ MWh}$$

Konklusionen er altså, at der med hensyn til brændselsforbrug er meget nær balance mellem de to alternativer.

Når man alligvel anser Turlough Hill - og mange andre lignende anlæg rundt om i verden - for at være særdeles attraktive, så er det af økonomiske grunde. Såfremt der forelig-

ger en egnet lokalitet, er det nemlig en erfaringssag, at anlægsudgifterne til et pumpekraftværk er betydeligt mindre end anlægsudgifterne til en fossilt fyret spidslastenhed med samme effekt. Mens et sædvanligt spidslastværk anvender meget dyrt brændsel (gasolie), drives pumpekraftværket altså af relativt billig overskudselektricitet fra grundlastværker.

Pumpekraftværker er ikke den eneste måde, hvorved man kan udnytte havede vandmasser som energilager. Naturen selv sørger via solvarme for at havvand fordamper for siden at ende som nedbør på steder, der er hævet over havets niveau. Når vandet i floderne søger ned mod havets niveau, vil det ofte danne vandfald, der kan udnyttes i traditionelle vandkraftværker. I blandt andet Norge og Sverige sker dette i stor udstrækning; Norge får nemlig hele sin elektricitet produceret på basis af vandkraft, mens det for Sveriges vedkommende drejer sig om ca. 60% på årsbasis.

På grund af det flade terræn er Danmark uheldigt stillet på dette område. Det største danske vandkraftværk (Tangeværket ved Gudenåen) har således kun en installeret effekt på 3,3 MW, hvilke er omkring $\frac{1}{2}$ promille af den samlede installerede effekt på alle danske værker. Vi henviser i øvrigt til Øvelse III, der giver en uddybende behandling af Tangeværket.

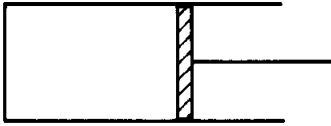
Selv om Danmark således kun råder over meget små vandkraftreserver på eget territorium (bortset fra Grønland), så spiller vandkraft alligevel en betydelig rolle i elværkerne daglige drift. Dette skyldes som nævnt i kapitel 1, at de danske elforbrugere er forbundet med det norske og svenske elnet via undersøiske elkabler, og at de norske og svenske vandkraftværkers producerede effekt kan reguleres op eller ned med meget kort varsel (ved at der lukkes mere eller mindre op for flodvandet).

De danske elværker kan derfor i vid udstrækning benytte disse vandkraftværker som billige spidslastværker, og til gengæld i vandfattige perioder eksportere elektricitet fra kulfyrede grundlastværker til Norge og Sverige.

3.2 Trykluftlagre

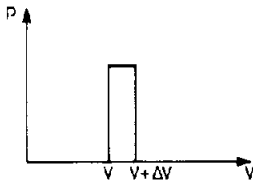
Denne lagringsmetode består i at komprimere atmosfærisk luft eller en anden gasart.

For at beregne hvor stor en energimængde, der kan lagres på denne måde, betragter vi en beholder forsynet med et stempel, som kan skubbes ud eller ind i beholderen.

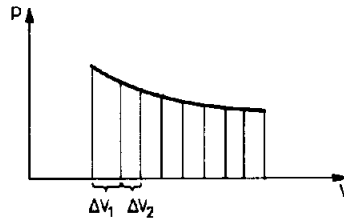


Figur 3.6

Lader vi den komprimerede gas udvide sig ganske lidt fra voluminet V til $V+\Delta V$ ved trykket p , udfører gassen arbejdet $p \cdot \Delta V$. I et (V,p) diagram er dette netop arealet af det lille rektangel i figur 3.7a.



Figur 3.7a

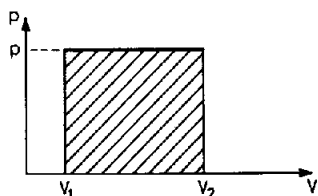


Figur 3.7b

Ved en udvidelse fra voluminet V_1 og trykket p_1 til voluminet V_2 og trykket p_2 kan det udførte arbejde angives som arealet under den kurve, der beskriver processen i (V,p) diagrammet. Dette ses let ved som på figur 3.7b at inddele stykket V_1 til V_2 i så små delintervaller, at man kan betragte trykket som værende konstant i hvert lille delinterval.

Det fremgår heraf, at arbejdets størrelse afhænger af den måde udvidelsen foregår på. Vi nøjes her med at opskrive det præsterede arbejde for to vigtige processer, og vi henviser læserne til Appendix A for så vidt angår udledelsen af formel (3.3).

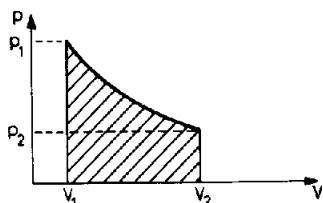
- a) En vilkårlig gas ved konstant tryk p (isobar proces)



Figur 3.8 Isobar proces

$$A = p \cdot (V_2 - V_1) \quad (3.2)$$

- b) En ideal gas ved konstant temperatur T (isoterm proces)



Figur 3.9 Isoterm proces

$$\begin{aligned} A &= p_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \\ &= p_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Såfremt beholderen er omgivet af atmosfærisk luft, kan vi dog ikke udnytte hele dette arbejde. For at overvinde atmosfæretrykket skal gassen nemlig præstere arbejdet $p_{\text{atm}} \cdot (V_2 - V_1)$, og følgelig bliver det tilgængelige nettoarbejde:

For en isobar proces:

$$A_{\text{netto}} = (p - p_{\text{atm}}) \cdot (V_2 - V_1) \quad (3.4)$$

For en isoterm proces:

$$A_{\text{netto}} = \begin{cases} p_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) - p_{\text{atm}} \cdot (V_2 - V_1) \\ \text{eller} \\ p_1 V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - p_{\text{atm}} \cdot (V_2 - V_1) \end{cases} \quad (3.5)$$

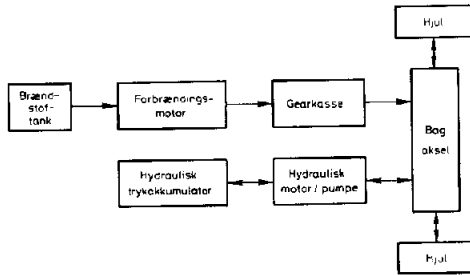
Eksempel 1. Lille trykluftlager

Komprimeres 10 m^3 gas ved 1 atm. tryk ($1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$) isotermt til 1 m^3 , er den oplagrede energi ifølge ligning (3.5)

$$E_{\text{netto}} = (1,013 \cdot 10^5) \cdot 10 \cdot \ln\left(\frac{10}{1}\right) \text{ J} - 1,013 \cdot 10^5 \cdot (10-1) \text{ J} \quad (3.6)$$

$$\approx 2,33 \text{ MJ (650 Wh)}$$

Altså en energitæthed på $2,3 \text{ MJ/m}^3$. Det er her relevant at sammenligne med energitætheden i naturgas, der er ca. 37 MJ/m^3 ved 1 atmosfæres tryk!



Figur 3.10 Skitse af en hybridbus, d.v.s en bus med flere forskellige drivsystemer (Buchwald, 1980).

På laboratoriet for energiteknik ved DTH har man i flere år eksperimenteret med en bybus, hvor den primære kraftkilde (dieselmotoren) er suppleret med en hydraulisk pumpe/motor, der er i forbindelse med en hydraulisk trykakkumulator.

Systemet fungerer på den måde, at dieselmotoren driver bussen i størstedelen af driftstiden. Under opbremsning af bussen sker der en trykstigning i trykakkumulatoren, idet kinetisk energi lagres som trykluftenergi. Under den efterfølgende acceleration hjælper den hydrauliske motor med at accelerere bussen, hvorved trykket falder. Systemet er vist skematisk på fig. 3.10.

Valget af det hydrauliske system fremfor andre energilagringsystemer (f.eks. svinghjul) har været bestemt af flere faktorer. For det første har et sådant system en rimelig

stor effektæthed, hvorved forstås ringe vægt og volumen i forhold til den effekt, der kan optages og afgives. Yderligere findes de nødvendige komponenter allerede på markedet, således at systemet ikke forudsætter ny teknologi.

Bussen har været prøvet under normale driftsbetingelser i København, og resultatet har været en brændstofbesparelse på 25-30% med heraf følgende mindre luftforurening, mindre støj og mindre bremseslid.

Dersom man regner med, at en bybus årligt kører 60.000 km med et gennemsnitligt forbrug på 2,3 liter pr. km, må man forvente en besparelse på op til 7.800 liter brændstof pr. bus om året.

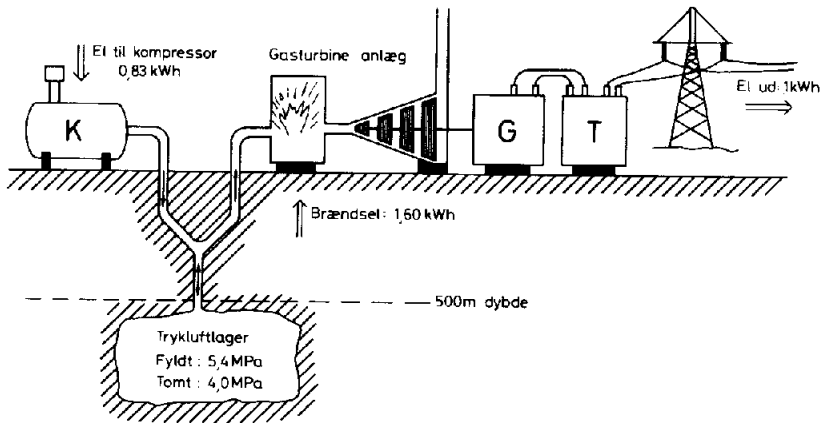
En yderligere besparelse ved systemet opnår man ved at udstyre bussen med en mindre dieselmotor. En almindelig bus er nemlig udstyret med en motor, der er dimensioneret til at klare accelerationer fra f.eks. stoppesteder. Under almindelig kørsel udnyttes den ikke fuldt ud og har derfor dårligere virkningsgrad.

Vi henviser i øvrigt til opgave 3.4, der netop omhandler praktiske forsøg med en hybridbus.

Eksempel 2. Stort trykluftlager

Eksemplet ovenfor viser, at dersom man ønsker at lagre energi i større mængder i trykluftlagre, vil det kræve enorme beholdere. Beholdere af stål eller beton vil være alt for dyre til dette formål, og derfor har interessen i de senere år samlet sig om at udnytte klippehuler eller hulrum, der er skyllet ud af salthorste. Teknikken er her velkendt, fordi man i mange år har fremstillet naturgaslagre efter netop denne metode.

Ved byen Huntorf i Nordtyskland indviede man i 1978 et kraftværk, der netop er udstyret med et stort trykluftlager i en salthorst 500 meter under jordoverfladen. Formålet med værket er det samme som for et pumpekraftværk, nemlig at udjævne døgnbelastningskurven for de øvrige elværker i regionen.



Figur 3.11 Skitse af Huntorfværket i Nordtyskland.

I perioder med lav belastning oplagres energi i form af komprimeret luft ved et tryk på 54 atmosfære (5,4 MPa) i magasinet, der er på 270.000 m³. I spidslastperioder tvinges den komprimerede luft gennem et forbrændingskammer, og der tilføres en passende mængde brændstof. Den resulterende voldsomme forbrænding får de varme gasarter til at udvide sig og derved drive en turbine, som er koblet til en sædvanlig elgenerator. Huntorfværket kan levere en maksimal effekt på 290 MW, og trykluftlageret er således dimensioneret, at det har kapacitet til 2 timers daglig drift ved den maksimale effekt.

Værkets energiregnskab fremgår af figur 3.11 og kommenteres i det følgende. Ligesom i tilfælde med Turlough Hill pumpekraftværket må vi også her sammenligne to alternativer A og B. A er det eksisterende Huntorf Trykluftanlæg, der fungerer i samspil med grundlastværker med nyttevirkning omkring 35%. B er derimod den tænkte situation, hvor Huntorf anlægget ikke fandtes, og hvor dets elproduktion i stedet blev varetaget af sædvanlige spidslastværker med nyttevirkning 25%.

Alternativ A: For at fremstille 1 kWh elektrisk energi kan vi opstille et lille regnestykke over det samlede brændselsforbrug (husk at kompressoren drives af el fra grundlastværker!)

$$\text{Drift og kompressor: } \frac{0,83 \text{ kWh} \cdot 100}{35} = 2,4 \text{ kWh brændsel}$$

$$\text{Direkte brændselsforbrug} = \frac{1,6 \text{ " "}}{4,0 \text{ kWh brændsel}}$$

Alternativ B: 1 kWh elektrisk energi fremstillet på et sædvanligt spidslastværk:

$$\text{Brændselsforbrug: } \frac{1 \text{ kWh} \cdot 100}{25} = 4,0 \text{ kWh brændsel}$$

Huntorfværket sparer altså ikke brændsel sammenlignet med et konventionelt spidslastværk, men det er en oplagt fordel at lægge en større del af elproduktionen over på grundlastværkerne, der jo producerer forholdsvis billig elektricitet (jfr. tilsvarende bemærkninger i afsnit 3.1 om pumpekraftværker). Der er dog grund til at understrege, at Huntorfværker er et forsøgsanlæg, og at det næppe kan siges at være økonomisk på nuværende tidspunkt; dertil har udgifterne ved etableringen af trykluftlageret været for store.

3.3 Svinghjul

I roterende svinghjul er der oplagret energi af høj kvalitet. Lige siden oldtiden har mennesket forstået at udnytte denne form for energilagring til løsning af kortvarige arbejdsopgaver (figur 3.12). I oldtidens pottemagerværksteder bestod energitilførslen i et skub med foden mod det nederste massive hjul på drejebordet. Den roterende masse lagrer den kortvarigt tilførte energi således, at rotationen forløber over et betydeligt længere tidsrum med en nogenlunde konstant omdrejningshastighed. Siden opfindelsen af dampmaskinen og eksplosionsmotoren er svinghjul desuden blevet anvendt i stor stil til at stabilisere disse maskiners omdrejningstal.

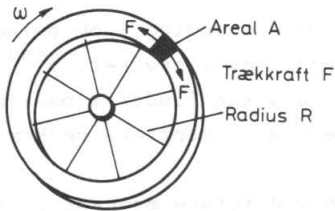
Både lagrede energimængder og lagringstider er særdeles beskedne i ovennævnte eksempler sammenlignet med vore dages typiske behov. Og det viser sig faktisk, at skal man lagre



Figur 3.12 Interiør fra pottemagerværksted i Antikken.

virkeligt betydelige mængder energi over lange tidsrum (timer eller dage) ved hjælp af svinghjul, vil dette kun være muligt, såfremt der udvikles svinghjulsmaterialer, der er de klassiske af jern, stål og cement langt overlegne m.h.t. lagret energitæthed.

Vi vil nu beregne hvor meget energi, der kan oplagres i et svinghjul. For at gøre problemet så enkelt som muligt vil vi antage, at massen M er samlet i en ring i afstanden R fra centrum, samt at hjulet roterer med vinkelhastigheden ω .



Figur 3.13 Skitse af simpelt svinghjul, hvor massen er koncentreret i periferien. Ethvert lille udsnit af hjulkransen påvirkes af trækkræfter fra de omkringliggende massedele.

Den samlede masse har åbenbart hastigheden $\omega \cdot R$, og følgelig er hjulets kinetiske energi

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (R \cdot \omega)^2 = \frac{1}{2} M \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (3.7)$$

Forholdet e_m mellem den kinetiske energi og hjulets masse kaldes masseenergitætheden. Den er altså givet ved

$$e_m = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (3.8)$$

mens volumenenergitætheden e_{vol} er

$$e_{\text{vol}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (3.9)$$

hvor ρ er massefylden af svinghjulsmaterialet.

Idet hjulet drejes rundt, opstår der trækkræfter i materialet, og det er disse trækkræfter, der leverer den nødvendige centripetalkraft til at opretholde den roterende bevægelse. I Appendix A vises, at den resulterende spænding σ (der er defineret som trækraft pr. arealenhed, $\sigma = \frac{F}{A}$) er givet ved:

$$\sigma = \rho \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (3.10)$$

Det følger heraf, at de maksimale energitætheder for det pågældende svinghjul bliver*

$$e_{\text{m}}^{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^{\text{max}}}{\rho} \quad (3.11)$$

$$e_{\text{vol}}^{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot \sigma^{\text{max}} \quad (3.12)$$

I disse formler er σ^{max} den maksimale spænding, som svinghjulsmaterialet kan holde til uden at gå i stykker. σ^{max} er naturligvis en materialekonstant, som kan findes i passende tabelværker - i hvert fald for de fleste stoffers vedkommende.

Af ligning (3.11) fremgår nu en ved første øjekast måske lidt overraskende kendsgerning. Det fremgår nemlig, at såfremt vi er ude efter at konstruere et svinghjul med størst mulig masseenergitetthed, da bør vi anvende et materiale med så lille massefylde som mulig, men til gengæld med så stor en σ^{max} som mulig! Man ledes herved til at interessere sig for visse moderne fibermaterialer med acceptable trækspændinger af samme størrelsesorden som for stål, men med en langt mindre massetæthed. Vi viser herunder en tabel, der be-

(*) For et svinghjul med en anden form fås energitætheder analoge til 3.11 og 3.12, bortset fra at faktoren $\frac{1}{2}$ bliver erstattet af en anden numerisk faktor.

lyser forskellige stoffers egnethed som svinghjulsmateriale (bemærk at de tre første stoffer er fibermaterialer).

Materiale	$\sigma_{\max}$	ρ	$e_m^{\max}$	
	(GN/m ²)		(MJ/kg)	(Wh/kg)
Glasfiber	3,5	2,5	0,70	194
Silicon	6,0	2,2	1,36	378
Kulfiber	2,6	1,9	0,68	189
Stål	4,2	7,9	0.27	75

Tabel 3.1 Nogle svinghjulsmaterialers egenskaber. (Post og Post, 1974).

I adskillige lande har man i mange år eksperimenteret med at bruge stålsvinghjul i bybusser til oplagring af bremsenergien, men som følge af den lave energitæthed ser det dog ikke ud til, at denne ide vil blive realiseret i større stil. De moderne fibermaterialer ser meget interessante ud på papiret (op til 10 gange så stor energitæthed som stål), men endnu er de dog ikke kommet ud over laboratoriestadiet. Det er følgelig endnu for tidligt at udtale sig definitivt om de fremtidige realistiske muligheder, der er knyttet til de moderne fibermaterialer.

3.4 Opgaver

(se også Øvelserne II og III).

1.

- Beregn på grundlag af oplysningerne om Turlough Hill i afsnit 3.1 hvor mange m³ vand, der skal pumpes fra nedre til øvre reservoir i løbet af et typisk døgn?
- Beregn hvor mange m³ atmosfærisk luft (ved 1 atmosfæres tryk), der befinder sig i trykluftmagasinet ved Huntorf, når dette er fyldt op? Hvor stor er den pågældende luftmængdes masse?
(Man må antage, at op- og afladning forløber isotermt).

2.

- a) Hvor stor er den oplagrede energimængde i 1 m^3 vand, der befinder sig i det øvre reservoir i Turlough Hill anlæget?
- b) Hvor stor er den oplagrede energimængde i 1 m^3 luft i trykluftmagasinet ved Huntorf? Regn med, at trykket er 54 atm (5,4 MPa) i det fyldte magasin, og at det er 40 atm (4,0 MPa) i det "tomme" magasin. Antag desuden, at op- og afladning forløber isotermt.

3.

Antag, at man engang i fremtiden vil kunne bygge svinghjul af alle de materialer, der er nævnt i tabel 3.1, og med energitætheder, der er halvt så store som de maksimalt mulige. Hvis svinghjulenes radier sættes til 1 m, og hvis de alle antages at have hele massen koncentreret i periferien, hvor store omdrejningstal er da nødvendige? (Angiv svaret i antal omdrejninger pr. sekund).

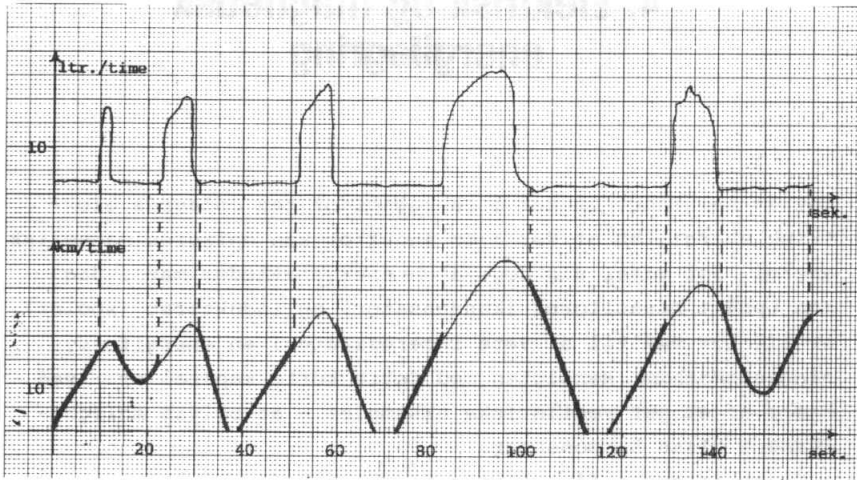
Hvor stor skal hjulkransens tværsnit være for hvert af svinghjulene, når der ialt skal være lagret 100 kWh?

4.

På figuren næste side er angivet et fartdiagram (nederst) for en hybridbus (jfr. eksempel 1 i afsnit 3.2). De fremhævede områder på fartdiagrammet markerer, hvor det hydrauliske system er i brug. Det øverste diagram viser, hvor meget dieselolie, der bruges pr. tidsenhed under kørslen.

- a) Angiv på fartdiagrammet, hvor der lagres energi i trykluft-akkumulatoren, og hvor trykluftenergi omdannes til kinetisk energi.
- b) Bestem bussens kinetiske energi 100 sekunder efter start, idet bussens masse antages at være 10 tons.
- c) Hvor stor en procendel af denne kinetiske energi genfindes 130 sekunder efter start?
- d) Bestem brændstofforbruget som arealet under øverste kurve.
- e) Bestem den tilbagelagte strækning som arealet under hastighedsgrafen.

- f) Beregn brændstofforbruget pr.time i det viste tidsrum (240s=4 minutter), og sammenlign med det gennemsnitlige forbrug i en almindelig bybus (2,3 l/km).

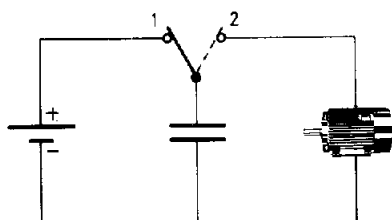


4. Elektrisk og magnetisk energilagring

Det er velkendt, at der i en kapacitor kan oplagres elektrisk energi, og at der i en induktor kan oplagres magnetisk energi. Det viser sig dog, at de energitætheder man i dag kan opnå i kapacitorer (kondensator) og induktorer (spoler) er alt for små til at være interessante i en energiforsyningssammenhæng. Hensigten med dette korte kapitel er - ved hjælp af et par realistiske eksempler - at belyse mulighederne i disse komponenter.

I det følgende får vi brug for et par formler, der er udledt i alle fysiklærebooks på gymnasialt niveau. Vi skal derfor ikke udlede dem her, men nøjes med at opskrive og kommentere dem ud fra et energilagringssynspunkt.

4.1 Elektrisk energilagring



Figur 4.1 Diagram af elektrisk kredsløb med kapacitor, der oplagrer energi i det elektriske felt mellem kapacitorpladerne. Når kontakten flyttes fra stilling 1 til 2, vil den oplagrede energi blive brugt til at drive motoren rundt.

Betragt en kapacitor med pladeareal A og afstand d mellem pladerne, og lad den indgå i et kredsløb, som vist på figur 4.1. Anbringes kontakten til $t=0$ i stilling 1, vil der strømme ladning til kapacitorpladerne, og der vil opstå en spen-

dingsforskel U mellem pladerne. Herved oplagres der en elektrisk energi E_{el} i det elektriske felt i plademellemrummet:

$$E_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (4.1)$$

hvor C er kapacitansen givet ved

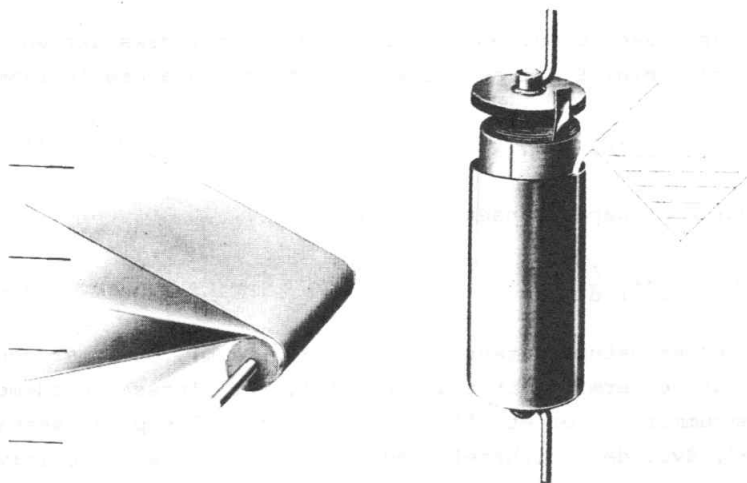
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (4.2)$$

ϵ_0 er en naturkonstant ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), og ϵ_r er den relative permittivitet af det stof, der findes i plademellemrummet. ϵ_r er et mål for dette materiales polariserbarhed, dvs. dets tilbøjelighed til at orientere de positive og negative ladninger i stoffets molekyler (dipoler) ind efter det elektriske felt. Alle materialer kan polariseres mere eller mindre, og følgelig er ϵ_r altid større end vakuumværdien, der er eksakt lig med 1. Tabel 4.1 viser, at typiske ϵ_r -værdier ligger i intervallet 1-10.

STOF	ϵ_r
Vakuum	1,0000
Luft	1,0006
Papir	1,6-2,6
Nylon	3,5
Glas	2-16
Glycerol	43
Rent vand	79

Tabel 4.1 Relativ permittivitet for nogle udvalgte materialer

Det fremgår af ligning (4.1) og (4.2), at man for at opnå en stor kapacitet må have et stort pladeareal, en lille pladeafstand og en høj værdi for ϵ_r . I praksis er kondensatorer derfor fremstillet som vist i figur 4.2.



Figur 4.2 (a) Plastik film kondensator. En tynd, isolerende film er rullet ind mellem to metalfolier. (b) Elektrolyt kondensator. Den ene kondensatorplade er et metalfolie, den anden en ledende elektrolyt og der skabes et tyndt isolerende lag på grænsefladen mellem elektrolyt og folie.

Hvor stor en energimængde kan egentlig lagres i en pladekapacitor? Svaret afhænger naturligvis af kapacitorens størrelse, men til de formål, vi her har i tankerne (f.eks. oplagring af elektrisk energi til brug i eldrevne køretøjer), vil det være rimeligt at forestille sig et lager på 1 m^3 . Lad os belyse forholdene ved hjælp af et simpelt eksempel.

Eksempel 1

En radiokondensator (elektrolytkondensator) på $2,2 \text{ mF}$ kan tåle en spænding på 100 V , vejer ca. 50 g og fylder omkring 30 ml . Når den er fuldt opladet rummer den energien:

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ F} \cdot (100 \text{ V})^2 = 11 \text{ J} \quad (4.3)$$

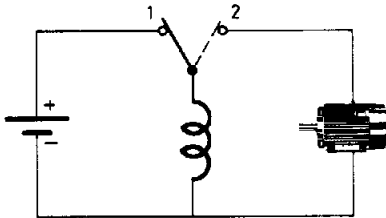
Energitætheden er derfor

$$\frac{E_{el}}{V} = \frac{11 \text{ J}}{30 \cdot 10^{-3} \ell} = 366 \text{ J}/\ell \quad (4.4)$$

En bil med et lager på 1 m^3 vil altså have oplagret en energi på $0,37 \text{ MJ}$, hvilket svarer til energiindholdet i ca. $9 \text{ m}\ell$ benzin!

Ovenstående eksempel viser klart, at kapacitorer er uden interesse til storstilet lagring af elektrisk energi. At de derimod spiller en enorm rolle i andre sammenhænge (f.eks. indenfor elektronik), hvor der ikke stilles store krav til energilagerets størrelse, men snarere til den hurtighed*, hvormed det kan op- og aflades, er en helt anden historie, som falder udenfor denne bogs rammer.

4.2 Magnetisk energilagring



Figur 4.3 Skitse af elektrisk kredsløb med induktor til oplagring af energi i magnetfelt.

Betragt en induktor (spole) med N vindinger, længde ℓ og tværsnittet A , og lad den indgå i et kredsløb, som vist på figur 4.3. Anbringes kontakten til tiden $t = 0$ i stilling 1, vil strømmen ikke straks vokse op til sin endelige værdi, da der ifølge Faradays induktionslov induceres en motoelektrisk kraft i strømkredsen. Når strømmen har nået sin stationære værdi I_{st} , vil der være oplagret magnetisk energi E_{mag} i det magnetiske felt, der er opbygget inden i spolen:

$$E_{mag} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{st}^2 \quad (4.5)$$

(*) En kapacitor med kapacitans C , som indgår i en elektrisk kreds med modstanden R , har en op- og afladningstid på $\tau \approx R \cdot C$. For passende R og C -værdier vil man således kunne opnå yderst korte reaktionstider ($\approx 10^{-6} \text{ sek}$).

L er spolens selvinduktion, der er givet ved

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{N^2 \cdot A}{l} \quad (4.6)$$

hvor μ_0 er en naturkonstant ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$), og μ_r kaldes den relative permeabilitet for materialet i spolens indre. μ_r er et mål for dette materiales polariserbarhed, dvs dets tilbøjelighed til at rette de elementære småmagneter i stoffet ind efter et pålagt magnetfelt. For luft er μ_r tæt ved vakuum-værdien 1, og det samme er tilfældet for næsten alle andre stoffer. En undtagelse udgøres af de såkaldte ferromagnetiske materialer, først og fremmest jern og stål, der har μ_r -værdier på adskillige tusinde (for specielle, kostbare legeringer kan μ_r komme helt op på noget i retningen af 10^6).

Når kontaktens stilling derpå ændres fra 1 til 2 kan denne oplagrede energi benyttes til at få udført et arbejde (få en motor til at køre rundt, for eksempel). Men det afgørende er naturligvis, hvor meget energi, der kan oplagres i magnetfeltet, samt hvor længe energien kan gemmes i spolen. Her har spoler i forhold til kondensatorer et væsentligt handicap. Problemet er, at en stor selvinduktion kræver, at spolen må have et stort vindingstal og følgelig en stor indre modstand. Hovedparten af den lagrede energi vil derfor hurtigt tabes som joulesk varme i spolens indre.

Eksempel 2

En typisk, stor induktor i et skolefysiklaboratorium er på 630 henry og tåler en strøm på max. 0,125 A. Den har ca. 10000 vindinger og en indre modstand på 280 Ω . Med jernkerne indsat vejer den 5 kg, og dens volumen er ca. 0,7 l. Energien, der er oplagret i denne spole, når strømmen er lig med den maksimalt tilladte værdi, er:

$$E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot 630 \text{ H} \cdot (0,125 \text{ A})^2 = 4,9 \text{ J} \quad (4.7)$$

og energitætheden

$$\frac{E_{\text{mag}}}{V} = \frac{4,9 \text{ J}}{0,7 \text{ l}} = 7,0 \text{ J/l} \quad (4.8)$$

Energien pr. volumenenhed i den betragtede spole er altså ca. 50 gange mindre end ved kondensatoren, energien pr. masseenhed ca. 200 gange mindre!

Desuden må man huske, at man hele tiden skal tilføre energi for at opretholde strømmen i spolen. I ovennævnte spole drejer det sig om, at der må tilføres en effekt på

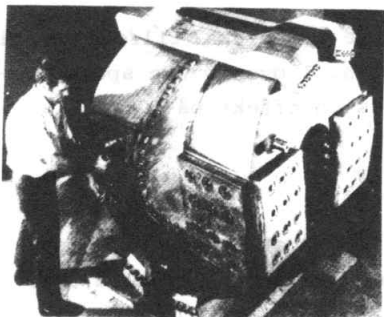
$$P = R \cdot I^2 = 280 \, \Omega \cdot (0,125 \text{ A})^2 = 4,4 \text{ W} \quad (4.9)$$

Det fremgår således af (4.7) og (4.9), at spolen i hvert sekund skal tilføres en energi, der er næsten lige så stor som den energi, den er i stand til at rumme.

Se i øvrigt Øvelse IV.

En effektiv energilagring i et magnetisk felt kan ifølge ovenstående kun etableres ved anvendelse af spoler uden (eller med meget ringe) elektrisk modstand. Og her er det, at de såkaldte superledende spoler kommer ind i billedet. Visse ledere har nemlig den egenskab, at den elektriske modstand helt forsvinder, når lederen afkøles til under en vis kritisk temperatur, der ofte ligger i intervallet 5-20 K. Når modstanden forsvinder kan man tillade sig at benytte langt stærkere strømme end i sædvanlige spoler, og derfor er det nærliggende at forestille sig energilagring i stor stil baseret på superledende spoler. Det følger af ligning (4.5), at den lagrede energimængde (og derfor også energitætheden) kan forøges stærkt. Prisen, man betaler for den forøgede energitæthed og for den lange tabsfrie lagringstid, er, at spolen skal anbringes i en såkaldt kryogenisk beholder, der konstant holdes på meget lave temperaturer. I praksis benyttes flydende helium som kølemiddel. Et sådant arrangement er yderst kostbart, og det er foreløbig kun realiseret ved anvendelser, hvor omkostningerne ikke er afgørende (f.eks. i forskningsprojekter vedrørende udnyttelsen af fusionsenergi), jævnfør figur 4.4.

Til sidst bør bemærkes, at superledende spoler kan gå hen og blive meget interessante som energilagre, men det forudsætter, at man finder frem til materialer, der bliver superledende ved langt højere temperaturer end de sædvanlige 10-20 K.



Figur 4.4 Superledende magnet på Lawrence Radiation Laboratory i USA. Spolen er 1 m i diameter og rummer ca. 1250 MJ.

5. Kemisk energilagring

Dette kapitel indledes med et teoretisk afsnit, hvori de vigtige kemiske størrelser, enthalpi (H) og kemisk potentiel energi (G), introduceres, og deres betydning klargøres ved hjælp af nogle eksempler. Er man kun interesseret i at få et overblik over de mange kemiske energilagringmetoder, der arbejdes med i dag, kan afsnit 5.1 udmærket overspringes. En mere kvantitativ behandling af kemisk energilagring forudsætter derimod, at dette afsnit studeres grundigt.

5.1 Kemisk energiberegning

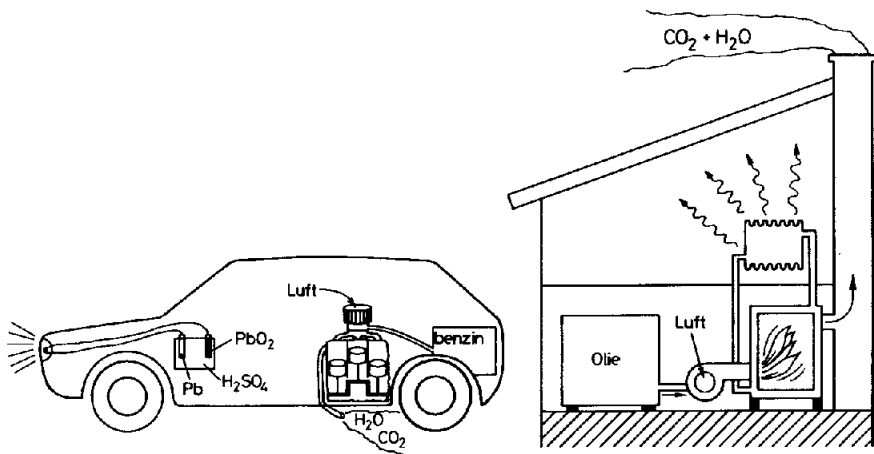
Når en kemisk proces forløber af sig selv (spontan), udvikles der energi, som kan udnyttes. Efter at processen er løbet til ende, er det kemiske system i ligevægt, og der udvikles ikke mere energi. Et kemisk system i uligevægt, bestående af flere stoffer, der kan reagere spontant med hinanden, rummer altså energi, som vi kalder kemisk energi.

Udgangsstofferne kaldes reaktanter, og de stoffer, der dannes, kaldes produkter. Forskellen mellem reaktanternes og produkternes energiindhold er den kemiske energi, der frigøres til omgivelserne:

REAKTANTER	→	PRODUKTER	+	energi
med høj energi		med lav energi		

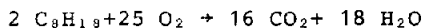
Hvis systemet skal kunne bruges til at lagre energi, må reaktanterne holdes adskilte eller på anden måde forhindres i at reagere, indtil energien ønskes frigjort. Når reaktanterne reagerer, kan energien frigøres på forskellig vis til

omgivelserne. F.eks. som elektrisk energi (fra et batteri), som varme (fra forbrænding i et oliefyr) eller som tryk-volumen-energi (fra en forbrændingsmotor).

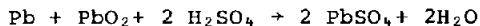


Figur 5.1 På figuren herover er vist nogle få eksempler på, hvordan kemisk energi udnyttes i vores dagligdag.

Reaktionen: REAKTANT + PRODUKT i figur 5.1 lyder for forbrændingen af benzin (oktan) i motoren:



Afladningsreaktionen i blyakkumulatoren:



Vi fastlægger nu, at grundstofferne i standardtilstanden (1 atm.) har energiindholdet nul. (Dette svarer til den frihed, man har til at fastlægge nultilstanden for potentiel energi i fysiske systemer). Det er så muligt at bestemme energiindholdet eksperimentelt i alle kemiske forbindelser og lave såkaldte termodynamiske tabeller over dette energiindhold i forhold til det valgte nulpunkt. Værdierne angives

normalt ved 25°C. Vi vil her skelne mellem to typer af kemisk energiindhold: enthalpi H og kemisk potentiel energi G*.

Enthalpi

En kemisk forbindelses enthalpi er den energi, der skal tilføres grundstofferne som varme ved konstant tryk, for at danne forbindelsen ud fra grundstofferne. Hvis forbindelsen ender i standardtilstanden, kaldes den tilførte varme for standardenthalpien (H^O). Hvis standardenthalpien er negativ, afgiver forbindelsen varme til omgivelserne under sin dannelse. Det er det mest almindelige.

Kemisk potentiel energi

Den kemiske potentielle energi er den mindste mængde højkvalitetsenergi (f.eks. el-energi), der skal tilføres ved konstant tryk og temperatur til grundstofferne for at danne forbindelsen. Standardværdien for den kemiske potentielle energi betegnes G^O . I databogen er standardværdierne angivet pr. mol for en mængde almindelige forbindelser. De molære størrelser skrives gerne som H_m^O og μ^O (**).

Der gælder altså (idet n er moltallet)

$$H^O = n \cdot H_m^O \quad \text{og} \quad G^O = n \cdot \mu^O \quad (5.1)$$

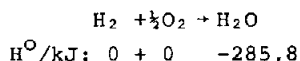
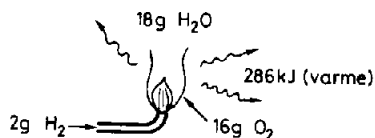
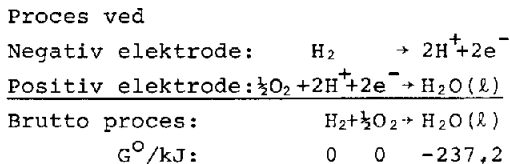
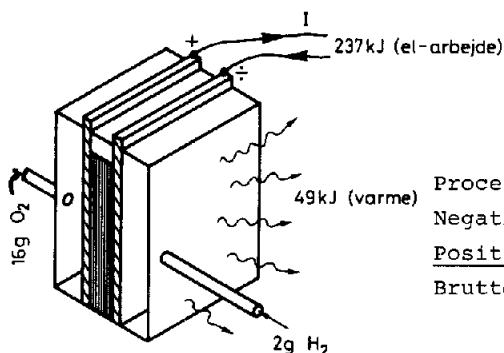
Man ser i de termodynamiske tabeller, at H_m^O og μ^O har værdierne nul for rene grundstoffer eller for 1 molære opløsninger. Det viser sig, at de fleste kemiske forbindelser har negative værdier for H_m^O og μ^O .

(*) Den kemiske potentielle energi G betegnes også Gibbs fri enthalpi.

(**) Det ville naturligvis være mest logisk at betegne den molære, kemiske potentielle energi G_m^O . Den gængse betegnelse er dog μ^O , der ofte kaldes det kemiske potential.

Eksempel 1: H° og μ° for vand ($H_2O(l)$)

I tabellen ser man f.eks., at vand har standardenthalpien $H^{\circ} = -285,8 \text{ kJ/mol}$ og den kemisk potentielle energi $G^{\circ} = -237,2 \text{ kJ/mol}$. Da begge værdier er negative, betyder det, at der frigøres energi til omgivelserne, når vand dannes af sine grundstoffer. Værdierne er beregnet for dannelse af 1 mol $H_2O (=18 \text{ g})$

Figur 5.2 Afbrænding af hydrogenFigur 5.3 Hydrogen-oxygen-brændselscellen. Processen kan vendes (er reversibel). Den modsatte proces er elektrolyse af vand.

Når 2g hydrogen forbinder sig med 16 g oxygen i en brændselscelle frigives altså 237,2 kJ som el-energi til omgivelserne, hvis processen forløber reversibelt (uden tab). Men da de 18 g vand har samme energiindhold som de 18 g, der dannes ved afbrænding af hydrogen, må differensen ($285,8 \text{ kJ} - 237,2 \text{ kJ} = 48,6 \text{ kJ}$) afgives som varme fra brændselscelle til omgivelserne. I praksis, hvor der er tab p.g.a. indre modstand, er varmeafgivelsen større.

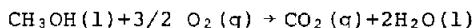
Energiberegninger ved kemiske reaktioner

Hvis man kender energiindholdet, H^O eller G^O , for reaktanterne og produkterne ved en kemisk reaktion, kan man nemt beregne den energi, der frigøres ved reaktionen. Den svarer nemlig til forskellen mellem reaktanternes energiindhold og produkternes energiindhold. Man får altså:

$$\text{Frigjort energi som varme} = H^O(\text{reakt.}) - H^O(\text{prod.}) = -\Delta H^O \quad (5.2)$$

$$\text{Frigjort høj kvalitetsenergi} = G^O(\text{reakt.}) - G^O(\text{prod.}) = -\Delta G^O$$

Når man beregner den frigjorte energi, må man huske, at energiindholdet er angivet pr.mol i de termodynamiske tabeller. Reaktionen skal derfor afstemmes støkiometrisk, inden man multiplicerer H_m^O og G_m^O med moltallene for stofmængderne, der indgår i reaktionen. Se beregningerne for afbrænding af methanol (træsprit) herunder.

Eksempel 2: Methanolforbrænding

$$H^O/\text{kJ}: -238,6 \quad 0 \quad -393,5 \quad 2 \cdot (-241,8)$$

$$G^O/\text{kJ}: -166,2 \quad 0 \quad -394,4 \quad 2 \cdot (-228,6)$$

Frigjort energi som varme:

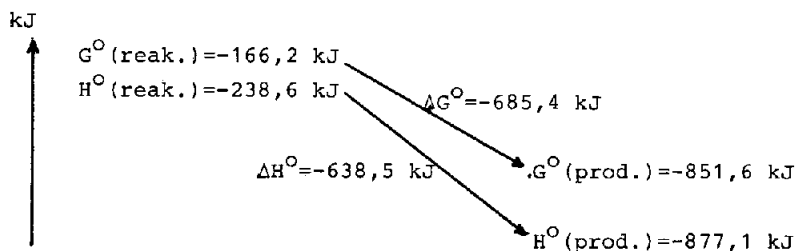
$$-\Delta H^O = -238,6 \text{ kJ} - (-393,5 \text{ kJ} - 483,6 \text{ kJ}) = 638,5 \text{ kJ/mol}$$

Frigjort høj kvalitetsenergi:

$$-\Delta G^O = -166,2 \text{ kJ} - (-394,4 \text{ kJ} - 457,2 \text{ kJ}) = 685,4 \text{ kJ/mol}$$

De 685,4 kJ er den maksimale mængde af høj kvalitetsenergi, der kan frigøres og i princippet udnyttes 100%.

Man opgiver ofte et brændstofs energiindhold i kJ pr.kg. Da methanol har molmassen 32 g, får man brændværdien $638,5 \text{ kJ}/0,032 \text{ kg} = 19950 \text{ kJ/kg}$. Sammenlign med tabel 5.4, side 94, og se i øvrigt opgave 5.1.



Figur 5.4 Energidiagram over energændringerne ved methanolforbrænding.

Energimålinger ved kemiske reaktioner

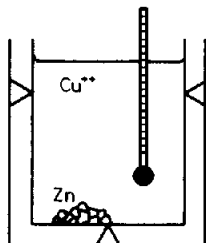
Måling af ΔH° . Da tabet af enthalpi er lig med den energi Q , der frigøres som varme til omgivelserne, kan denne størrelse nemt måles med et kalorimeter:

$$-\Delta H^{\circ} = Q \quad (5.3)$$

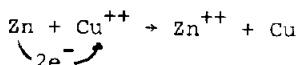
Q kan bestemmes fra kalorimeterets varmekapacitet C og temperaturstigning ΔT , idet $Q = C \cdot \Delta T$. Faktisk burde reaktionen foregå ved konstant temperatur, men da enthalpien er praktisk talt uafhængig af temperaturen, er dette en ubetydelig fejl.

Eksempel 3: Redoxproces mellem zink og kobberioner

Sammenblandes zink og kobbersulfat vil der overføres elektroner fra zink til kobberionerne. Reaktionsskemaet er



Figur 5.5 Direkte reaktion mellem zink og kobberioner.



$$H^{\circ}/(\text{kJ/mol}): \quad 0 \quad 64,8 \quad -153,9 \quad 0$$

Når 1 mol zink reagerer med en 1 molær kobbersulfatopløsning, frigøres altså reaktionsvarmen: $-\Delta H^{\circ} = 218,7 \text{ kJ/mol}$.

Tilsætter vi således 0.1 mol Zn (=6,54 g) til et kalorimeter med varmekapaciteten 900 J/K (ca. 200 g H₂O), og har vi i kalorimetret en 1 molær kobbersulfatopløsning, bør vi derfor registrere en temperaturstigning på

$$T = \frac{Q}{C} = \frac{0,1 \text{ mol} \cdot 218700 \text{ J/mol}}{900 \text{ J/K}} = 24,3 \text{ K}$$

Måling af ΔG°

Faldet i kemisk potentiel energi kan måles, hvis man blot kan konstruere et element, hvis bruttoreaktion er den kemiske proces. Man skal så bestemme elementets elektromotoriske spænding $\mathcal{E}$ samt beregne den ladning q , der skal passere mellem elementets poler for at danne 1 mol af det ønskede produkt. Den elektriske energi $\mathcal{E} \cdot q$ er da lig med faldet i kemisk potentiel energi:

$$-\Delta G^{\circ} = \mathcal{E} \cdot q \quad (5.4)$$

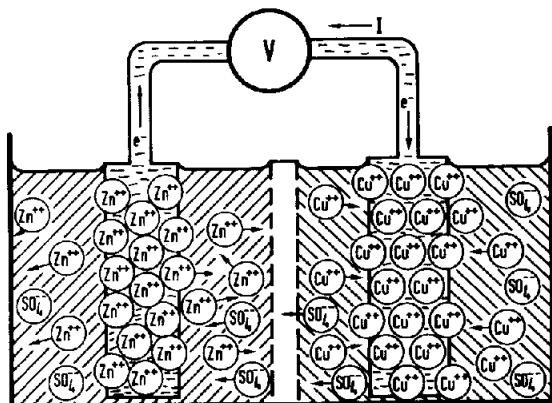
q kan beregnes fra det antal mol elektroner (n), der omsættes i reaktionen. Da ladningen af et mol elektroner er $F = N_A \cdot e = 96500 \text{ C/mol}$ fås $q = n \cdot 96500 \text{ C}$.

Eksempel 4: Beregning af hydrogen-oxygen-cellens spænding

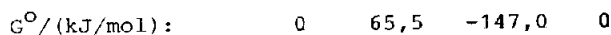
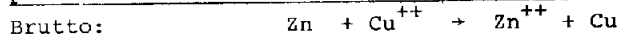
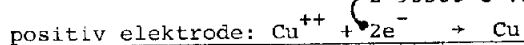
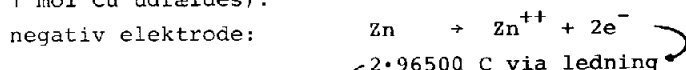
I eksemplet med hydrogen-oxygen-brændselscellen ser man af elektrodereaktionerne, at der passerer 2 mol elektroner i kredsløbet hver gang, der dannes 1 mol H₂O. Da $-\Delta G^{\circ}$ er 237,2 kJ fås:

$$\mathcal{E} = \frac{-\Delta G^{\circ}}{2 \cdot 96500 \text{ C}} = \frac{237200 \text{ J}}{2 \cdot 96500 \text{ C}} = 1,23 \text{ V}$$

Det er bemærkelsesværdigt, at man kan måle $\mathcal{E}$ som en spænding. Det er altså muligt at beregne ΔG for processen, selv om processen praktisk talt ikke forløber.



Figur 5.6 Daniell-elementet. De to elektrodeprocesser skrives således, (man tænker sig, at 1 mol Zn opløses og 1 mol Cu udfældes):



Altså er den frigjorte højkvalitetsenergi: $-\Delta G^0 = 212,5 \text{ kJ/mol}$.

Eksemplet med Daniell-elementet viser, at en kemisk proces kan bringes til at forløbe af sig selv (spontant) så længe, den kan afgive el-energi, d.v.s. hvis blot $\Delta G < 0$ for processen.

Ligevægten indtræder når $\Delta G = 0^*$

ΔH kan derimod være enten positiv eller negativ for processen.

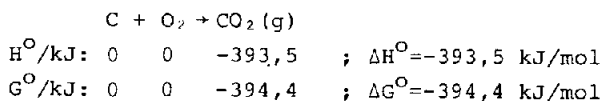
(*) Vi har her undgået, at se på ΔG 's koncentrationsafhængighed. Når Daniell-elementet aflades, betyder koncentrationsændringerne for Zn^{++} og Cu^{++} , at ΔG for processen stiger, indtil $\Delta G = 0$.

Er $\Delta H < 0$, bortledes energi som varme, og processen kaldes exoterm. I modsat fald kaldes processen endoterm.

Hvis et elektrisk element afgiver energien $-\Delta G$ som el-energi vil det afgive $-\Delta H - (-\Delta G) = -\Delta H + \Delta G$ som varme til omgivelserne. Denne størrelse kan være både positiv og negativ, jfr. øvelse V afsnit C.

5.2 Naturligt forekommende brændsel

Indtil for godt hundrede år siden var energilagring identisk med oplagring af organisk affald, træ og kul. Fælles for disse materialer er, at den kemiske energi kan frigøres ved en kemisk proces, nemlig oxidation af carbon (kulstof) med luftens oxygen:



Processen kaldes en forbrænding, og materiale, der på denne måde kan frigøre energi, benævnes brændsel. I de sidste årtier er det kul, olie og naturgas, som er blevet verdens vigtigste brændsler. Ikke mindre end ca. 80% af verdens energiforbrug dækkedes i 1980 af fossile brændsler, ca. 10% af biomasse (skyldes hovedsagelig anvendelse af træ og husdyrgødning som brændsel i U-landene), mens bidragene fra vandkraft og kernekraft var henholdsvis 6% og 3%.

Biomasse. Biomasse i form af marginale træressourcer*, overskudshalm og husdyrgødning er en ganske betydelig brændselsressource i Danmark. De to førstnævnte former udnyttedes allerede i ret stort omfang som simpelt brændsel, mens udnyttel-

(*) Marginale træressourcer omfatter: Udnyttede trædele fra skovene, affaldstræ fra træindustrier, affaldstræ fra træbeskæringer i læhegn, frugtplantager og haver samt affaldstræ fra byggepladser.

se af husdyrgødning så småt er ved at komme igang gennem opførelse af biogasanlæg. Tabel 5.1 viser, at der er ganske anseelige mængder biomasse til rådighed.

Type af affald	Produktion Mton/år	Tørstofindhold %	Nedre brændværdi af tørstof, MJ/kg	Energiindhold PJ/år
Marginale træres-sourcer	1,5	40-50	18-20	12
Over-skudshalm	2	80-90	17,5	30
Husdyr-gødning	27	18-25	14-19	95
Danmarks primære energiforbrug 1981:				721 PJ

Tabel 5.1 Den årlige danske produktion af de vigtigste affaldsstoffer i skov- og landbrug samt disse stoffers energiindhold. (Skyum, 1980; Have, 1980).

Kul. Da verdens kulressourcer (målt efter energiindhold) anslås at være mindst 10 gange så store som olieressourcerne (Martinsen og Nielsen, 1981), er det forståeligt, at man har fået fornyet interesse for udnyttelse af kul efter oliekrisen i 1973. En vigtig forudsætning for en storstilet udnyttelse af kul er også til stede: Energitætheden af kul er såvel med hensyn til masse (~30 MJ/kg) som med hensyn til volumen (~45 MJ/l) tilstrækkelig høj til, at transport over lange afstande kan betale sig.

Kul har i de senere år fortrængt anvendelsen af olie, specielt i industrien og indenfor elproduktionssektoren, hvilket bl.a. hænger sammen med prisen på kul i forhold til olie og med en vældig udvikling indenfor kulforbrændingsteknologien. Kul er også et godt udgangsmateriale for fremstilling af brændsel, jfr. afsnit 5.3.

Olie. Den fyldt olietank har så at sige alle de kvaliteter, man kan forlange af et godt energilager, og den udgør da også den mest anvendte form for lagring af energi overalt i den industrialiserede del af verden. Her er nogle af de kvaliteter eller egenskaber, som er årsag til dette:

1. Hurtig påfyldning og aftapning af energi

Den mængde energi, der pr. tid kan overføres til lageret (effekten), er høj. Effekten ved påfyldning af benzin på vore biler er således omkring 30 MW.

2. Høj virkningsgrad ved overførsel til lager

Eneste tab ved overførsel af energi til lageret er de strømningstab, som dækkes af energi tilført en eventuel pumpe (og de par dråber, der spildes). Virkningsgraden er derfor tæt på 100%.

3. Lang tabsfri lagringstid

Hvis proppen er sat i, og afgangshanen er lukket, er der i princippet ingen begrænsning med hensyn til lagringstiden, og så længe beholderen er intakt, er tabet nul.

4. Højt energiindhold

Den energimængde, der kan lagres pr. masseenhed og pr. volumenenhed (energitætheden), er stor.

5. Lagerets indhold er høj kvalitetsenergi

I princippet kan lagerenergien omsættes næsten 100% til elektricitet, da kemisk energi er høj kvalitetsenergi, jfr. afsnit 1.2.

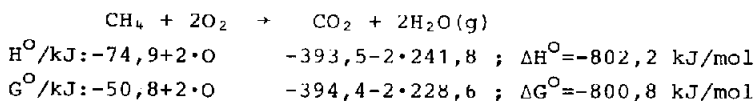
6. Beskedne materialekrav til container og overføringssystem

Opbevaringen kan foregå ved almindelig temperatur og tryk, og der er ingen korrosionsproblemer ved anvendelsen af gængse materialer til beholder og armatur.

Oliens energitæthed er højere end alle andre fossile brændstoffers (~40 MJ/kg og ~30 MJ/l), og det er en af grundene til, at hovedproblemet med hensyn til energilagring er at finde erstatninger for den fyldte oiletank. (Jensen, 1979).

Naturgas. Naturgas forekommer ofte i sammen geologiske formationer som råolie, og den består hovedsagelig af methan (CH₄).

Forbrændingsprocessen er følgende:



Naturgas egner sig ikke umiddelbart til lagring på grund af den lave energitæthed (~0,04 MJ/l). Ved nedkøling til -162°C

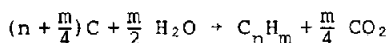
bliver naturgas flydende, og der opnås energitætheder svarende til olie, men der knytter sig betydelige sikkerhedsmæssige problemer til håndtering og transport af flydende naturgas. På steder, hvor underjordiske hulrum eksisterer, eller hvor de kan etableres for en rimelig pris, er det dog muligt at lagre store mængder af luftformig naturgas. I forbindelse med det danske naturgasprojekt vil der således blive etableret et lager på 260 millioner m³ ved Lille Thorup i Himmerland. Hulrummet fremkommer ved, at man skyller et tilsvarende rumfang salt ud af en salthorst.

5.3 Syntetisk brændsel

Ved syntetiske brændstoffer forstås i det følgende brændstoffer, der ikke er fremstillet ud fra råolie. Det er især til anvendelse i transportsektoren, som i dag er næsten 100% afhængig af brændstoffer fremstillet af råolie, at de syntetiske eller alternative brændstoffer skønnes at komme til at spille en rolle. Det betyder, at syntetisk olie og benzin er de mest fordelagtige alternativer, idet disse brændstoffer kan anvendes i eksisterende forbrændingsmotorer. Desuden kan de distribueres via de nuværende tankstationer, uden at det er nødvendigt at foretage nogen som helst ændringer af de tekniske installationer. I modsætning hertil kræver andre syntetiske brændsler som methanol, ethanol, methan, hydrogen og ammoniak betydelige ændringer, såfremt de anvendes i ren form. En mulighed, som også bliver forsøgt, er derfor at bruge nogle af dem som tilsætningsbrændstof. Eksempler herpå er de forsøg, der i øjeblikket foregår i USA og i Brasilien, hvor man tilsætter 15-20% ethanol til almindelig benzin. Blandingen kaldes i USA for Gasohol, der er en sammentrækning af det amerikanske slangudtryk for benzin, nemlig gas, og betegnelsen alkohol. I USA fremstilles alkohol til dette formål ved gæring af majs.

Resten af dette afsnit indeholder en kort omtale af de ovenfor nævnte syntetiske brændsler.

Syncrude. Denne betegnelse er en forkortelse af "syntheric crude oil", og vi kunne altså på dansk sige, at det er det samme som syntetisk råolie. Fremstillingen af syncrude er ikke af ny dato. Allerede under 2.verdenskrig fremstillede tyskerne syncrude ud fra kul ved en proces, som med enkelte forbedringer er brugt i stor udstrækning i Sydafrika gennem de sidste 10 år. Processen betegnes efter dem, der har udviklet den, "Fischer-Tropsch syntesen". Processen kan beskrives ved reaktionsligningen



En sådan "petrokemisk" fremstilling af olie ($C_n H_m$) giver en vifte af hydrocarboner (kulbrinter), der indeholder mellem et og tyve carbonatomer.

Fremstilling af syntetisk råolie ud fra kul er en i forhold til de nuværende oliepriser dyr proces, som kun kan motiveres ud fra en krisesituation, således som det f.eks. var tilfældet i Tyskland under 2.verdenskrig. Prisen er af sydafrikanerne angivet som dobbelt så stor som råolieprisen, og det er vel at mærke uden at regne prisen for kul med. (Sydafrikanske kul er billige, fordi de ligger tæt ved overfladen). For Danmarks vedkommende er løsningen ikke aktuel, idet vi her i landet ikke råder over billige kulressourcer.

Syntetisk benzin. Syncrude kan viderebehandles i de eksisterende raffinaderier, og man kan således på normal måde fremstille syntetisk benzin. En for danske forhold mere interessant løsning er at fremstille syntetisk benzin ud fra naturgas. Det danske firma Haldor Topsøe A/S er igang med et EF-støttet projekt, som sigter mod at forbedre den samlede virkningsgrad for et naturgasbaseret benzinanlæg. Med dagens teknik er denne virkningsgrad under 60%, dvs. at højst 60% af naturgassens energiindhold kan genfindes i den producerede syntetiske benzin.

Der er to problemer knyttet til fremstilling af syntetisk benzin ud fra naturgas. Det ene problem er, at den teknisk/økonomisk rentable størrelse af anlæggene til fremstilling af syntetisk benzin vurderes til at være over 10.000 tons i

døgnnet. For at udnytte spildvarmen fra et sådant anlæg, er det selvsagt nødvendigt med et meget stort varmekonsum i nærheden af anlægget. Det andet problem, som til dels er kædet sammen med det første, er prisen på benzinen, der med en forventede pris på dansk naturgas, bliver over 2 kr/liter. Og det er ca. dobbelt så meget som den nuværende benzinpris uden skatter, afgifter, distributionsudgift og forhandler-avance.

Methanol (CH_3OH) kan fremstilles af kul og naturgas. Tidligere fremstillede man methanol ved tør opvarmning af træ - deraf trivialbetegnelsen træsprit.

Methanol anvendt i forbrændingsmotorer giver i forhold til benzin en mindre forurening i form af nitrogenoxyder (NO_x), men lugtgenerne er på grund af aldehyd-udsendelse betydeligt større. Ren methanol er giftig, og endvidere virker den korroderende over for en række metaller og plastmaterialer. Endelig skal man på grund af den lavere energitæthed have en ca. dobbelt så stor tank til samme energimængde, og der er desuden betydelige koldstartproblemer forbundet med anvendelsen af ren methanol.

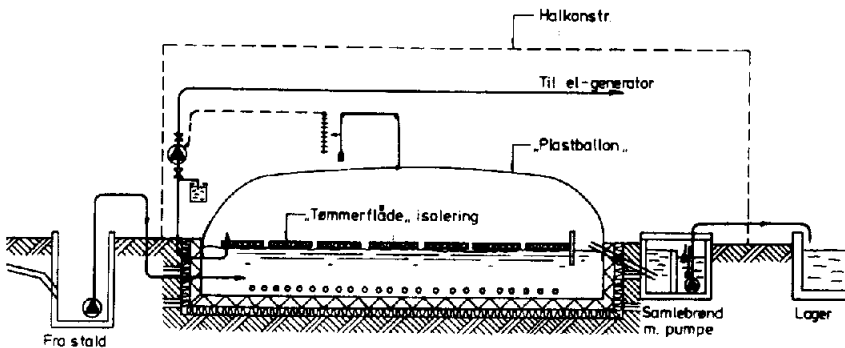
Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) kan fremstilles ud fra organiske materialer ved forædling. En produktion i større målestok er sat i gang i Brasilien, hvor sukkerrør omdannes til alkohol ved enzymgæring. De enzymer, som anvendes ved processen, er udviklet af det danske firma NOVO, som for øvrigt også leverer enzymer til den amerikanske gasohol produktion.

Ethanol er velegnet som tilsætningsbrændstof, og op til 25% ethanol i benzinen kan anvendes i traditionelle motorer uden større problemer.

Der har forståeligt nok været en del kritik af brugen af proteinrige udgangsmaterialer (som f.eks. majs) til fremstilling af brændstoffer. Herved reduceres fødevarerproduktionen i en tid, hvor millioner af mennesker i andre dele af verden dør af sult hvert år. Derfor samler interessen sig de fleste steder om at udnytte organiske affaldsstoffer i stedet for potentielle fødevarer. Procesomkostningerne

er imidlertid større ved anvendelse af disse billige udgangsmaterialer, og en dansk produktion af ethanol må derfor skønnes forbeholdt som en mulighed i en decideret krisesituation.

Biogas er betegnelsen for den gasblanding (ca. 60% CH_4 og 40% CO_2), der fremkommer ved den såkaldte anaerobe (uden tilgang af luftens oxygen) nedbrydning af organisk materiale. En biogasreaktor består af en lufttæt beholder, hvori gødning eller andet organisk materiale opbevares ved ca. 35°C , og hvorfra den dannede gas kan ledes til forbrugsstedet. Et eksempel på et biogasanlæg er vist i figur 5.7. Det viste anlæg er et fuldskala demonstrationsanlæg, som Samarbejdsgruppen til Teknologisk Udvikling af Biogasanlæg (STUB) har bygget på Assendrup Hovedgård i nærheden af Næstved. Lagringen af gassen finder sted i en plastballon, som udgør den øverste del af reaktoren. Gassen ledes herfra til en gasmotor/generator og bruges således til fremstilling af såvel varme som el.



Figur 5.7 Assendrup biogasanlæg

Kilde: Handelsministeriets biogasprogram, juli 1979.

Der har været mange tekniske problemer med de biogasanlæg, der er sat i drift under STUB programmet. Det gælder specielt problemer med det såkaldte svømmelag - en hård skorpe

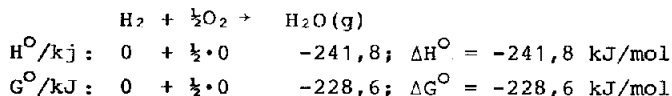
som dannes oven på det flydende materiale i reaktoren. Problemet synes dog nu at være løst af et privat firma, Højbrogård Biogas i Nørre Åby på Fyn. Under Energiministeriets forskningsprogram søger man at få afklaret de teknisk-økonomiske problemer vedrørende biogasanlæg, og om ganske få år vil man kunne bedømme, i hvor stort omfang en udbygning med disse anlæg vil finde sted i Danmark.

Ammoniak (NH_3) er en farveløs gas med et i forhold til naturgas højt kogepunkt (-33°C), og den kan således lagres på samme måde som flaskegas, idet den ved stuetemperatur bliver flydende ved en beskeden kompression (ca. 9 bar ved 20°C). Alligevel er ammoniak ikke særlig velegnet som brændstof i transportsektoren. Ved anvendelse i forbrændingsmotorer er ulemperne giftighed, korrosionsevne og langsom forbrænding. Hertil kommer meget væsentlige lugtgener fra uforbrændt ammoniak i udstødningsgassen.

Ammoniak er imidlertid et velegnet lagermedium, når det drejer sig om flytning af energi. Det er på grund af det høje kogepunkt nemt at transportere ammoniak i flydende form om bord i tankskibe. Det kan produceres på afsides steder, hvor der er energi til rådighed, og transporteres til steder, hvor der er forbrug. Det har da også været foreslået at producere ammoniak ved hjælp af vandkraft på Grønland og bruge det som kunstgødning i Europa. Herved spares energi i Europa, idet der så skal fremstilles mindre mængder ammoniak her.

Hydrogen. Gennem de sidste årtier har man med mellemrum udpeget hydrogen som fremtidens sekundæreenergiform* og energilagringsmedium, fordi fremstillingen kan foregå ud fra vand ved elektrolyse på ethvert sted på jordkloden, hvor der er elektricitet til rådighed. Endvidere udviser hydrogen af alle syntetiske brændstoffer den største massenergitæthed, og omsætningen eller forbrændingen af stoffet er forureningsfri, idet der gendannes vand. Forbrændingsprocessen

(*) Primære energiformer: Kul, råolie, naturgas, uran, vandkraft og solenergi. Sekundære energiformer (el, benzin, hydrogen etc.) fremstilles ud fra de primære energiformer.

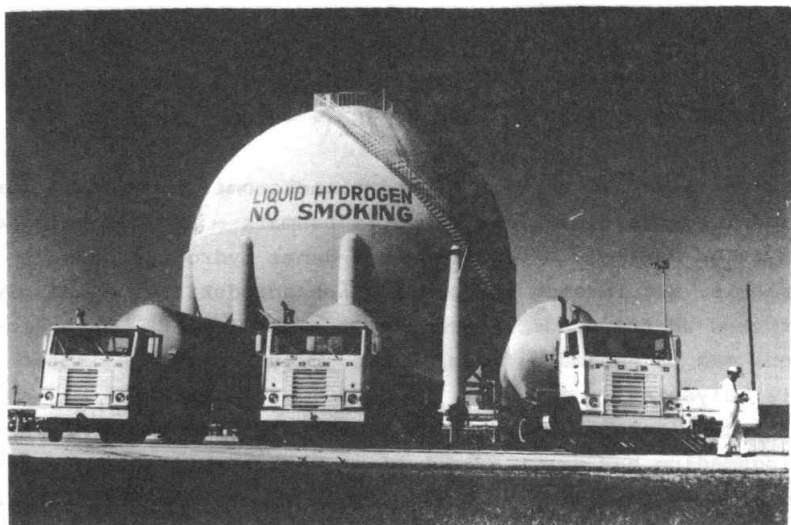


Man har ligefrem talt om en hydrogenøkonomi. Det er i den forbindelse interessant, at vi her i Danmark - nærmere betegnet på Askov Højskole - var først med denne hydrogenøkonomi i praksis. Her foretog man omkring århundredskiftet elektrolyse af vand ud fra vindmølleproduceret elektricitet. Den hydrogen, man på den måde fremstillede, blev brugt i gaslamper til belysning.

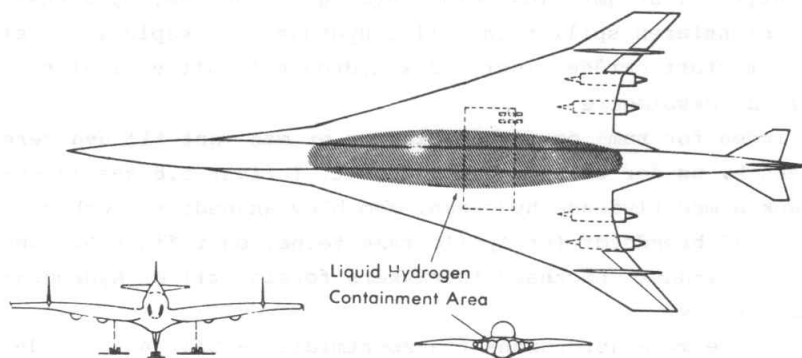
Diskussionen om hydrogen som fremtidigt brændstof og lagringsmedium har været præget af en vældig optimisme. Realiteterne er imidlertid, at man bør understrege ordet "fremtidigt", både fordi udbygningen med billig elektricitet fra kernekraftværker ikke er forløbet som engang forventet, men også fordi der knytter sig en række ulemper til anvendelsen af hydrogen. Ulemperne er i første række det lave kogepunkt ($-252,5^\circ\text{C}$), som medfører, at der kræves avanceret teknisk udstyr til at gøre (og holde) hydrogen flydende; også eksplosionsfaren spiller en rolle. Hydrogen er eksplosivt i et meget stort område, idet 4-80% hydrogen i luft er i stand til at eksplodere.

Inden for rum- og flyteknologien er man vant til avanceret teknik, og der er hydrogen velegnet. I figur 5.8 ses lagertanken med flydende hydrogen, som blev anvendt til opbevaring af brændstof for Apollo raketterne, og i figur 5.9 ses de amerikanske Lockheed fabrikkers forslag til et hydrogen-drevet fly.

Til de mere jordbundne transportmidler - bilerne - er de avancerede kølesystemer, som er nødvendige for at gøre hydrogenen flydende, for dyre og for komplicerede. Men her er metalhydriderne en mulighed, som allerede er demonstreret af den tyske bilfabrikant Daimler-Benz. Et metalhydrid er et metal, hvori der er bundet store mængder hydrogen, jfr. tabel 5.2.



Figur 5.8 Tank med flydende hydrogen på John F. Kennedy Space Center, USA. (Jensen, 1980).



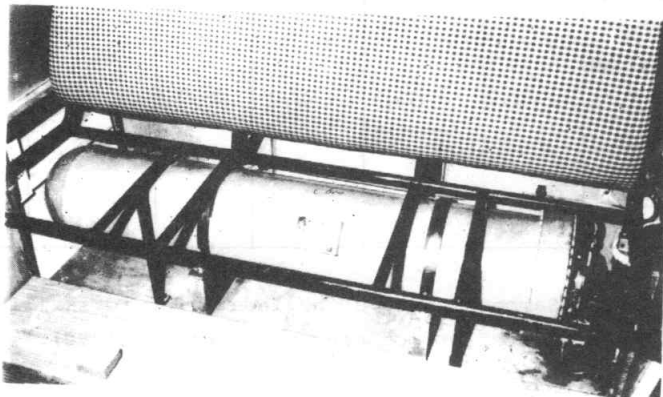
Figur 5.9 Plan for supersonisk fly med flydende brint som drivmiddel. Kilde: Lockheed, USA.

	MJ/kg	MJ/l
Gas ved 1 atm. og 20°C	120	0,013
Gas ved 150 atm. og 20°C	120	1,7
Væske, -252°C	120	10,5
Metalhydrid (inc.metal)	1,4-11	17,5-20,5
Olie til sammenligning	44	40

Tabel 5.2 Energitætheder for hydrogen i forskellige former sammenlignet med energitæthederne for olie. Kilde: Risø's Metallurgiafdeling.

Som nævnt i afsnit 2.2 frigøres der termiske energi, når hydrogen bindes i metallet eller metallegeringen. Et par af problemerne med metalhydriderne består i at borttransportere denne energi, og at undgå, at metaller pulveriserer efter nogle "op- og afladninger". Herhjemme har Energiministeriet sat forskning i gang på Forsøgsanlæg Risø med det formål at løse disse problemer, specielt hvad angår et af de mest lovende og billige metalhydrider (MgH_2).

Hos Daimler-Benz i Tyskland satser man på anvendelsen af metalhydrider til drift af såvel vare- som personbiler. I figur 5.10 er vist et hydridlager placeret i en varevogn, og i tabel 5.3 er der angivet nøgledata og køretøjets aktionsradier for to basismetaller.



Figur 5.10 Metalhydrid som energilager i varevogn. Kilde: Daimler-Benz.

Metal	Volumen (l)	Masse (kg)	H ₂ lagret (kg)	Aktionsradius (km)
TiFe	50	200	4	150
Mg	50	100	8	300

Tabel 5.3 Lagringsdata og aktionsradius for to basismetaller. Kilde: Daimler Benz.

Sammenfattende kan det siges om syntetiske brændstoffer, at det er de økonomiske begrænsninger, der betinger deres fremtidige udbredelse til anvendelse inden for transportsektoren. De er alle mere eller mindre egnede rent teknisk. Syntetisk benzin og dieselolie er de bedst egnede, idet de kan anvendes uden ændringer af eksisterende motorer og distributions-systemer. På langt sigt er det nok især hydrogen, der frembyder de mest interessante muligheder både som brændsel og som lagringsmedium. En oversigt over nøgledata for de nævnte brændstoffer sammenlignet med benzin er anført i tabel 5.4.

	Benzin	Methanol	Ethanol	Methan	Ammoniak	Hydrogen
Kogepunkt K	250-400	337	352	111,7	240	20,3
Massefylde Kg/m ³	702	793	791	425	771	71
Masseener- gitæthed (flyden- de) MJ/kg	42,7	20,0	26,8	50,1	18,6	120
Volumen- energi- tæthed (flyden- de) MJ/l	31,2	16,0	22,0	21,2	14,3	9,0

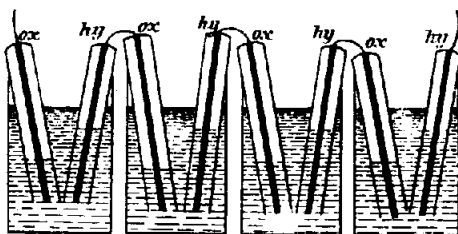
Tabel 5.4 Sammenligning af nøgledata for forskellige syntetiske brændstoffer med benzin (J-Jensen, 1980).

5.4 Brændselsceller

Elektrokemiske energikilder kan groft klassificeres i batterier og brændselsceller. Fælles for begge typer er, at kemisk energi omsættes direkte til elektrisk energi ved processer, som foregår med høj effektivitet (virkningsgrad). Forskellen består i, at batterier har energilageret indbygget, mens brændselsceller får tilført den kemiske energi udefra i form af brændsel (eksempelvis hydrogen eller methanol). Hydrogen-oxygen brændselsceller har været anvendt i udstrakt grad i kraftforsyning (elforsyning) i rumforsøgene med flydende H_2 som det egentlige lagermedium eller brændsel. Det var et svigt i én af tre brændselsceller, der gjorde, at rumfærgen Columbia i november 1981 måtte vende tilbage til jorden efter at have gennemført halvdel af den planlagte flyvetid.

Når man har foretrukket de forholdsvis dyre brændselscellesystemer i rumfarten, skyldes det, at det samlede lager- og konverteringsanlæg udviser en høj energitæthed. Og det er vigtigt til denne anvendelse, hvor det koster mange penge, hver gang man skal sende et ekstra kg op i rummet.

Brugen af brændselsceller har indtil nu været begrænset til meget avancerede anvendelser, men påvisningen af selve princippet for omdannelse af hydrogen og oxygen direkte til elektricitet dateres, som det fremgår af figur 5.11, helt tilbage til 1839.

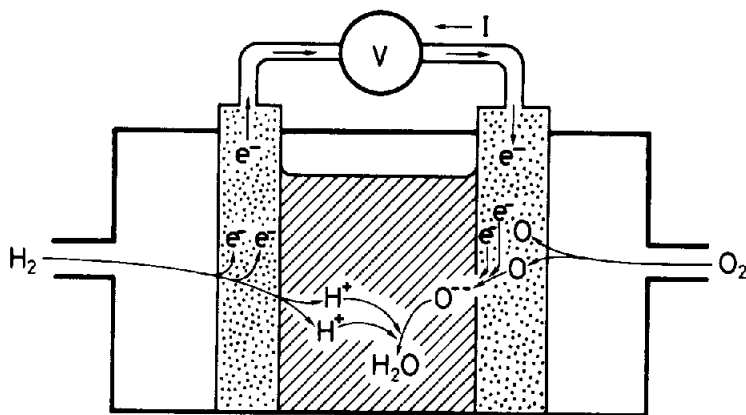


Figur 5.11 Den engelske jurist William Grove påviste i 1839 princippet i hydrogen-oxygen brændselscellen. Kilde: Philosophical Magazine 1842. 1.halvår p.303.

Fra kemitimerne forsøg med knaldgas ved vi, at H_2 og O_2 reagerer særdeles kraftigt ved en forbærndingsproces, der nærmest er at betegne som en eksplosion. Der frigøres 285,8 kJ pr. mol vand, jfr. figur 5.2.

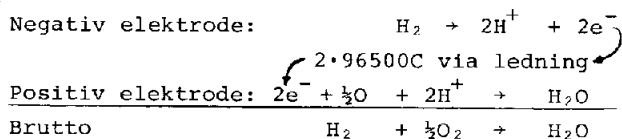
Hvis man i stedet lader H_2 og O_2 reagere ved elektrokemiske processer, kan man få frigjort en højkvalitetsenergi, (el-energi) på 237,2 kJ pr. mol vand. Dette er kun muligt, hvis man adskiller den elektronafgivende og den elektronoptagende proces. På figur 5.12 er det illustreret, hvordan dette finder sted i en hydrogen-oxygen-brændselscelle.

Ved hydrogenelektroden dannes hydrogenioner, som vandrer ud i elektrolytten, og elektroner, der ledes ud i det ydre elektriske kredsløb. Ved oxygenelektroden dannes H_2O af oxygen, som optager H^+ fra elektrolytten og elektroner fra elektroden. Elektrolyt og separator tillader hydrogenionerne (H^+) at vandre fra hydrogenelektroden, hvor de dannes, til oxygenelektroden, hvorimod elektronerne må følge den ydre metalliske leder.



Figur 5.12 Principskitse for en hydrogen-oxygen brændselscelle.

Man kan skrive de to elektrode-processer således (man tænker sig, at 1 mol H_2 forbinder sig med $\frac{1}{2}$ mol O_2 , hvorved der passerer 2 mol elektroner gennem ledningen, og der dannes 1 mol H_2O):



Som nævnt i tilknytning til figur 5.3 frigøres der en energi på $-\Delta G^0 = 237 \text{ KJ pr. mol H}_2$, og den elektromotoriske spænding bliver derfor:

$$\mathcal{E} = \frac{-\Delta G^0}{2 \cdot 96500 \text{ C}} = \frac{237200 \text{ J}}{193000 \text{ C}} = 1,23 \text{ V}$$

I praksis vil spændingen mellem brændselscellens poler være omkring $\mathcal{P} \approx 0,7 \text{ V}$, men $\mathcal{P}$ afhænger dog af belastningen, jfr. tilsvarende forhold for blyakkumulatoren (Se Øvelse V).

Cellens virkningsgrad η er derfor:

$$\eta = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{E}} = \frac{0,7 \text{ V}}{1,23 \text{ V}} = 0,6$$

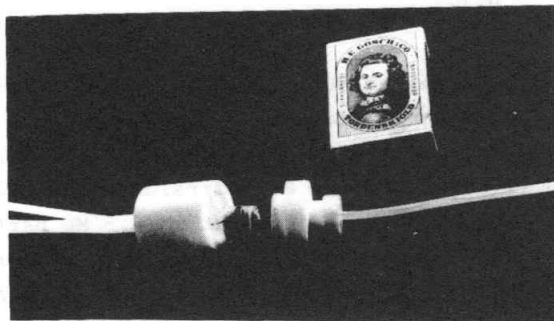
Det vil altså sige, at 60% af den tilførte energi omdannes til højkvalitetsenergi (elektricitet), og resten - de 40% - bliver til varme. Til sammenligning kan nævnes, at en dieselmotors virkningsgrad er af størrelsesorden 0,2-0,3.

I USA har man for nylig afprøvet en 4,5 MW nafta-drevet brændselscelle med phosphorsyre-elektrolyt. Der er tale om en hydrogen-oxygen-brændselscelle, idet naftaen omdannes til hydrogenholdig gas, inden den ledes ind i cellen. På samme måde kan man anvende andre carbonhydrider, og der er ikke tvivl om, at denne type brændselscelle vil få stor betydning for naturgasbaseret, decentral kraft-varmeproduktion, såfremt det lykkes at fremstille cellen til en rimelig pris. Problemet er, at elektroderne til celler med flydende elektrolyt (og dermed forholdsvis lave driftstemperaturer) er meget kostbare at fremstille, blandt andet fordi der kræves ædelmetal (platin) til katalyse af processen.

En mulig fremtidig løsning er udviklingen af en faststof-elektrolyt, som er stabil i et højere temperaturområde, hvor billige elektrodematerialer kan anvendes. Energiministeriet har under energiforskningsprogrammet 1982 (EFP 82) sat forskning vedrørende faststofmaterialer til brændselsceller i

gang ved Odense Univesitet. Her udviklede man allerede i 1976 den første celle med faststofelektrolyt (se figur 5.13).

Brændselscellers egnethed for anvendelse til energilagringssystemer er naturligvis bundet til lagringsevnen for brændslet, således som det er beskrevet i de foregående afsnit. Af særlig interesse er langtidslagringen af elektricitet i mindre decentrale anlæg, specielt hvad angår vindmølleproduceret elektricitet. Her er muligheden den, at fremstille hydrogen ved elektrolyse - lagre hydrogenen ved en af de i afsnit 5.3 omtalte metoder - og så anvende hydrogen til fremstilling af elektricitet i en hydrogen-oxygen-celle. Fordelen ved denne fremgangsmåde i forbindelse med langtidslagring (sæsonlagring) er, at der praktisk taget ikke forekommer tab, når hydrogenen først er lagret. Dette er i modsætning til de fleste elektriske batterier, der kræver vedligeholdelsesopladning.

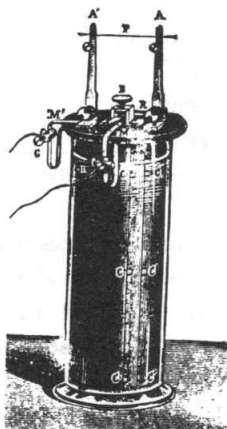


Figur 5.13 Laboratorieprototypecelle med faststofelektrolyt. (J.Jensen, 1980).

5.5 Sekundære batterier

Anvendelsen af sekundære batterier såvel til stationære formål som til transport er domineret af blybatteriet, som i sin oprindelige udførelse blev udviklet af franskmænden Planté omkring 1860 (se figur 5.14).

En opladet blyakkumulator består af en negativ elektrode af Pb og en positiv elektrode af PbO_2 samt en elektrolyt bestående af ca. 40% H_2SO_4 i vand.

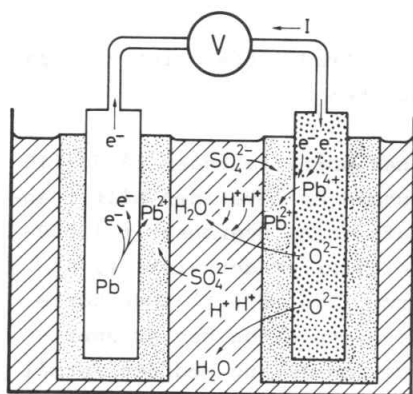


Figur 5.14 Bly-syre batteriet opfundet af Planté omkring 1860.

Den simpleste måde at angive elektrodeprocesserne på er at opfatte PbO_2 som bestående af Pb^{4+} -ioner og O^{2-} -ioner.

Ved afladning sker der det, at Pb efterlader to elektroner i Pb-elektroden og bliver til Pb^{++} . Elektronerne vandrer gennem den ydre leder til PbO_2 -elektroden og forbinder sig med Pb^{4+} -ionerne, der omdannes til Pb^{++} -ioner. De dannede Pb^{++} -ioner forbinder sig med sulfationerne SO_4^{--} og danner tungtopløseligt blyulfat PbSO_4 , der sætter sig på elektroderne. Desuden dannes der vand ved reaktion mellem oxidionerne O^{--} og H^+ fra elektrolytten.

Disse reaktioner er søgt illustreret på figur 5.15.



Figur 5.15 Principskitse af blyakkumulatoren. Elektrodeprocesserne kan skrives således ved afladning af 2 mol elektroner:

Negativ elektrode: $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{++} + 2\text{e}^-$

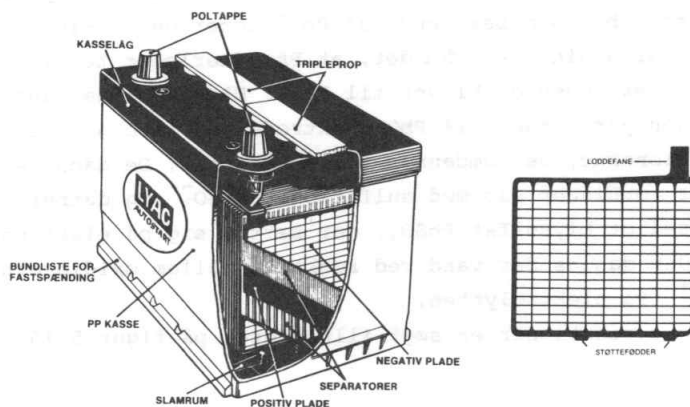
Positiv elektrode: $2\text{e}^- + \text{Pb}^{++} \rightarrow \text{Pb}^{++}$

Sulfatdannelse: $2\text{Pb}^{++} + 2\text{SO}_4^{--} \rightarrow 2\text{PbSO}_4$

Vanddannelse: $2\text{O}^{--} + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Brutto: $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Tomgangsspændingen eller den elektromotoriske spænding $\mathcal{E}$ er 2,05 V, og den indre modstand er på grund af svovlsyrens høje ledningsevne så lav, at batteriet er velegnet til at afgive store strømstyrker. Det gælder i særlig grad den type batteri, vi kender fra vore biler - startbatteriet, hvor elektroderne (af den såkaldte smurt-plade type) er anbragt tæt op ad hinanden. Denne type batteri er vist i figur 5.16.



Figur 5.16 Startbatteri med elektrodegitter vist til højre. Kilde: A/S Accumulatorfabrikken Lyac.

Batterier af smurt-plade typen har energitætheder på 70-110 kJ/kg og høj effekt, men til gengæld er levetiden målt i antal op- og afladninger ved 80% afladning begrænset til 300-500. Til anvendelse i elektriske biler er det vigtigt, at batteriet kan afgive en stor strøm (høj effekt) i de korte perioder, hvor køretøjet skal accelerere, og her er smurt-plade batteriet velegnet. En videreudvikling med det formål at forøge levetiden er imidlertid påkrævet.

Den anden type blybatteri er det såkaldte rørcellebatteri, som udmærker sig ved lang levetid (> 1500 op- og afladninger). Ulempen for denne type er lav effektæthed (W/kg) - et forhold, der er uden betydning for stationære anlæg med lange op- og afladningstider og for køretøjer som gaffeltrucks, hvor vægten ingen rolle spiller. Konstruktionen af rørcellebatteriet er vist i figur 5.17.

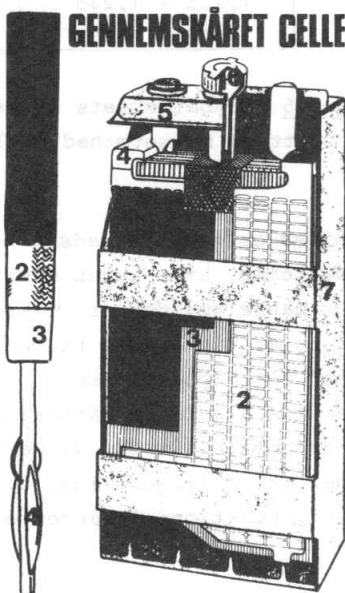
POSITIVT RØR

GENNEMSKÅRET CELLE

1. Positiv rørplade.
2. Negativ gitterplade.
3. Separator.
4. Polbro.
5. Cellelæg.
6. Celleprop.
7. Cellekasse.
8. Bundprisme.
9. Separatorbeskytter.

POSITIVT RØR

1. Perforeret plastrør.
2. Vævet glasfiber.
3. Aktiv masse.
4. Blystav.



Figur 5.17 Rørcellebatteri. Kilde: A/S Accumulatorfabrikken Lyac.

En videreudvikling af rørcellebatteriet med det formål at forøge effektætheden er i gang. Ved anvendelse af fladtrykte rør kan afstanden mellem elektroderne mindskes, og den mindre indre resistans, som følger heraf, giver batteriet en større effekt.

Elektrolytten i et opladet blybatteri består af ca. 40% svovlsyre og 60% destilleret vand. Dette forhold ændrer sig ved afladning, og ved at måle syremængden i elektrolytten - måle massefylden - kan man bestemme batteriets ladetilstand. Hertil bruges en syremåler (massetæthedsmåler eller hydro-

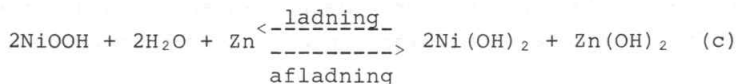
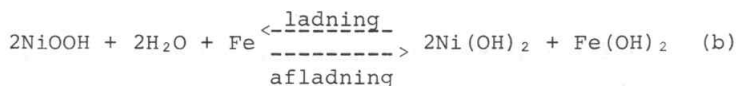
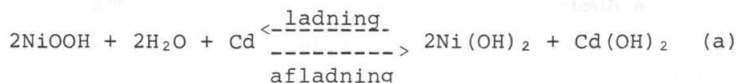
meter), som har en svømmer, der indikerer massetætheder fra 1,100 til 1,300 kg/l. Sammenhængen mellem massetæthed og ladetilstand fremgår af tabel 5.5 (Se også Øvelse V).

Massetæthed (kg/l)	Ladetilstand
1,265 - 1,290	1/1 opladet
1,235 - 1,265	3/4 opladet
1,205 - 1,235	1/2 opladet
1,175 - 1,205	1/4 opladet

Tabel 5.5 Blybatteriets ladetilstand som funktion af elektrolyttens massetæthed. Kilde: A/S Accumulatorbrikken Lyac.

Til elbiler er massetæthedsmålingerne en noget besværlig måde at bestemme, hvor megen energi, der er tilbage i batteriet (hvor mange km, der er tilbage). Mange opfindere forsøger da også nu at finde frem til en ny, billig og sikker "benzinmåler" for blybatterier.

Der er tre alkaliske batterier (basisk elektrolyt), som fortjener omtale: Ni/Cd, Ni/Fe og Ni/Zn. De to førstnævnte er kommercielt tilgængelige, og det sidstnævnte er under udvikling. Reaktionsligningerne for de tre batterier er som følger



Hvis man meget kort skal beskrive fordele og ulemper for de tre batterier, kan det gøres ved at anføre, at Ni/Cd batteriet har høj effekttæthed og lang levetid, men det er dyrt; Ni/Fe batteriet har høj energi- og effekttæthed samt lang

levetid, men der er problemer med driftstemperaturområde og virkningsgrad; og endelig Ni/Zn batteriet, der har særdeles god energi- og effekttæthed, men ringe levetid. I tabel 5.6 er anført data for disse batterier til sammenligning med data for blybatteriet og natrium-svovl batteriet. Sidstnævnte vil vi kort beskrive i det følgende.

Batteri	Pb	Ni/Cd	Ni/Fe	Ni/Zn	Na/S
Elektrolyt	H ₂ SO ₄	KOH	KOH	KOH	β-Al ₂ O ₃
Spænding (V)					
$\bar{\mathcal{E}}$	2,05	1,35	1,37	1,71	2,1
$\mathcal{P}$ (typisk)	1,9	1,2	1,2	1,6	1,7
Virkningsgrad(%)	75	70	<60	75	75
Energitæthed (kJ/kg)	110	110	200	270	500
Effekttæthed (W/kg)	25	140	220	200	120

Tabel 5.6 Data for forskellige batterisystemer. Energitætheden svarer til en afladningstid på 5 timer. Ved kortere afladningstid er energitætheden mindre, jfr. Øvelse V bag i bogen.

I midten af 1960'erne demonstrerede Ford Motor Company i USA princippet for Na/S-batteriet med den keramiske Na-ionleder, beta-alumina, som elektrolyt. Batteriet, som siden er fremstillet i størrelser op til 360 MJ (100 kWh), anses for et af de mest lovende elektrokemiske systemer for oplagring af elektricitet i større mængde. Det skyldes, at de materialer, der medgår til fremstillingen, findes i rigelige mængder, og der er således ingen resourcemæssige begrænsninger for at kunne opnå en lav fremstillingspris.

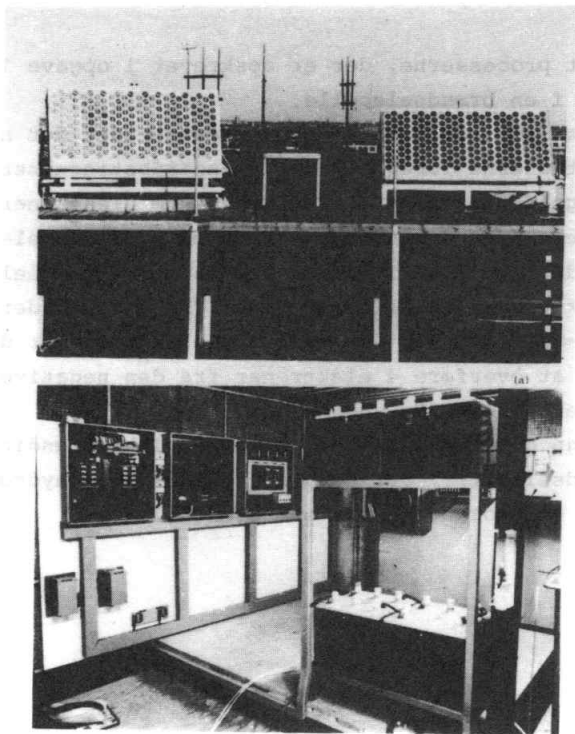
Reaktionen Na med S giver Na₂S₅, som ved starten af afladningsforløbet dannes på overfladen af beta-alumina elektrolytten på svovlsiden. Ved afslutningen af afladningen dannes Na₂S₃. Reaktionsprodukterne i form af disse polysulfider må holdes flydende, og det kræver, at processerne for-

løber ved en temperatur på 300-350°C. Batteriet forventes at være kommercielt tilgængeligt til anvendelse for lastudjævning i midten af 1980'erne.

Som nævnt i afsnit 5.5 er en udvikling af avancerede faststofbatterier sat i gang, men praktiske resultater kan først forventes på langt sigt. Indtil det er tilfældet, må vi påregne, at blybatteriet vil være det batteri, der vil finde anvendelse til såvel stationære som transportformål. Et par eksempler på sådanne anvendelser er vist i figurerne 5.18 og 5.19.



Figur 5.18 Den danske elbil M-Car, udviklet af Merrilds Maskinfabrik, Herning i samarbejde med Laboratoriet for Energiforskning, Odense Universitet.



Figur 5.19 Solcelle/batterianlæg, konstrueret af Strømforsyningssektionen, Jydsk Telefon i samarbejde med Laboratoriet for Energiforskning, Odense Universitet.

5.6 Opgaver (Se også Øvelse V).

1.
 - a) Opstil forbrændingsligninger for følgende stoffer: hydrogen (H_2), methanol (CH_3OH), ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) og methan (CH_4).
 - b) Benyt Databogen til at beregne ΔH° -værdier for hver af disse processer, idet det antages, at vand dannes på dampform ($\text{H}_2\text{O}(\text{g})$).
 - c) Beregn forbrændingsvarmen i kJ/kg for hvert af brændstofferne og sammenlign med tabel 5.4, side 94.

2.

Antag at processerne, der er opskrevet i opgave 1, i stedet foregår i en brændselscelle.

- a) Beregn ΔG^0 for hver af processerne, idet det antages, at reaktionerne foregår under standardbetingelserne.
- b) Beregn den ladning (i Coulomb), som elektronerne transporterer fra den negative til den positive elektrode, når der er omsat 1 mol af brændslet i brændselscellen. Man kan benytte følgende regel: Hver gang, der forbruges 1 O_2 -molekyle ved den positive elektrode, er det nødvendigt at overføre 4 elektroner fra den negative elektrode, og der dannes $2H_2O$ -molekyler.
- c) Beregn den teoretiske elektromotoriske spænding $\mathcal{E}$ for en brændselscelle, der udnytter henholdsvis hydrogen, methanol, ethanol og methan som brændsel.

6. Sammenfatning

Sammenfatning

Vi har i denne bog omtalt mange forskellige systemer til lagring af energi, og vi har set, at de bl.a. adskiller sig stærkt fra hinanden ved (a) deres energitætheder, (b) deres kapitalomkostninger, (c) deres nuværende udviklingsstadium og (d) deres potentielle fremtidige muligheder. Vi har derfor fundet det hensigtsmæssigt at opsummere nogle af disse forskelligheder i et par sammenfattende tabeller. I tabel 6.1 vises typiske energitætheder - såvel energi pr. masseenhed som energi pr. volumenenhed - der optræder i diverse energilagringssystemer. I de tilfælde hvor energilagringen forudsætter et temperaturniveau, som afviger fra de sædvanlige temperaturer i vore omgivelser, er dette angivet. Mens tabel 6.1 således kun indeholder kontante oplysninger, som de fleste fagfolk vil kunne enes om, er mange af oplysningerne i tabel 6.2 derimod usikre. Det gælder således oplysningerne om, hvornår nye energilagringssystemer vil være kommercielt tilgængelige; det gælder også skønnene over størrelse, levetid og konstruktionstid for disse energilagringssystemer. Og det gælder i ganske særlig grad skønnene over, hvad det vil komme til at koste (i 1981-kroner), at oplagre energimængden 1 joule ved hjælp af metoder, som endnu ikke er færdigudviklede. Sådanne oplysninger må naturligvis kun opfattes som subjektive ekspertskøn. Det er således slet ikke udelukket, at den teknologiske udvikling kan åbne op for muligheder, som de fleste eksperter i dag er tilbøjelige til at nægtere, og at mange af oplysningerne i tabel 6.2 derfor kan vise sig at være urealistiske om nogle år.

Vi afslutter med nogle få subjektive kommentarer til tabel 6.2: Lagring af lavtemperatur termisk energi i velisoleerede beholdere bygger på velkendt teknologi. Denne form for energilagring må i dag anses for at være økonomisk i forbindelse med kraftvarme produktion (jfr. figur 2.10) og i forbindelse med udnyttelse af solenergi til opvarmningsformål (jfr. afsnit 2.4 for korttidslagre og afsnittene 2.6 og 2.7 for sæsonlagre).

Pumpe-vandkraftlagring bygger på velkendt teknologi og er økonomisk attraktiv. I de hidtil byggede anlæg er det øvre reservoir en kunstig sø og det nedre reservoir i reglen en naturlig sø eller fjord, men i fremtiden vil det muligvis være omvendt. Dette skyldes, at der er færre geologiske barrierer og færre miljøproblemer forbundet med at etablere kunstige vandreservoirer under end over jordoverfladen. De økonomiske forhold er dog endnu ikke helt afklarede for sådanne store underjordiske vandreservoirer.

Store trykluftlagre har været kommercielt tilgængelige siden 1977 (Huntorf anlægget), men økonomisk set er de ikke så attraktive endnu, at man kan forvente en hurtig udbygning med trykluftlagre i de kommende år.

Mekanisk energilagring i svinghjul er attraktiv, fordi lagringseffektiviteten er høj, og fordi svinghjulet meget hurtigt kan accelereres og nedbremses (herved bliver den opnåelige effekt meget stor). Men selv for de avancerede svinghjul, der er under udvikling, vil lageromkostningerne antagelig blive så store, at det vil begrænse anvendelsen af svinghjul til områder, hvor høj effekt i korte tidsrum er afgørende.

Magnetisk energilagring i superledende spoler vil næppe kunne realiseres i stor stil, med mindre det lykkes at finde frem til billige materialer, der bliver superledende allerede ved temperaturer over 100 K. Lykkes dette, er perspektiverne til gengæld meget store, men før år 2000 skal man næppe vente at se sådanne anlæg i drift.

Kemisk energilagring i batterier er en bekvem energilagringsform med gode potentielle muligheder. Når det gælder små energilagre, er batterier allerede den mest udbredte måde at lagre elektrisk energi på. En anvendelse i større skala forudsætter dog en succesrig udvikling af avancerede batte-

rier med forbedrede egenskaber i forhold til de velkendte blybatterier. Til stationære anvendelser indenfor elproduktion og eldistribution er det især faktorer som pris og driftssikkerhed, der tæller. Til transportformål er der derimod først og fremmest behov for stærkt forbedrede energi- og effekttætheder.

Brint byder på helt enestående muligheder i forbindelse med udnyttelse af de vedvarende energikilder. Men så længe der ikke er sket meget betydelige fremskridt i forsknings- og udviklingsarbejdet vedrørende brintproduktion, brintlagring og brintudnyttelse (brændselsceller), skal man ikke forvente nogen storstilet anvendelse af brint i verdens energiforsyning. Dertil er de nuværende lave effektivitetstal og høje kapitalomkostninger en alt for effektiv barriere.

	Energitætheder (*)		Temperatur (°C)
	(kJ/kg)	(kJ/l)	
Sædvanlige brændsler			
Olie	40000	30000	
Kul	30000	45000	
Træ	15000	7000	
Termisk Lagring (varmefylde)			
Vand	210	210	20-100
Granit	40	105	20-100
Jern	40	205	20-350
Termisk lagring (faseændring)			
Is (smeltning)	335	340	0
Vand (fordampning)	2270	2270	100
Salhydrater (smeltning)	180	290	30-70 (typisk)
Elektromagnetiske lagre			
Kapacitor	~ 1	~ 1	
Superledende Spole	~ 20	~ 100	- 200 (?)
Mekanisk lagring			
Hævet Vand (100 meter)	1	1	
Trykluft		20	
Svinghjul (stål)	70	1000	
Svinghjul (avanceret)	700 (?)	10000 (?)	
Kemisk Lagring			
Brint (flydende)	120000	9000	- 250
Brint (metalhydrid)	~4000	~6000	
Ethanol	28000	22000	
Methanol	21000	16000	
Benzin	42000	32000	
Blybatterier	140 (600)	280	
Nikkel-cadmium batterier	360	360	
Natrium-svovl batterier	540 (2500)	540	300-375
Lithium-svovl batterier	540 (5000)	540	

(*)

Teoretiske værdier i parentes.

Tabel 6.1 Typiske energitætheder for forskellige energilagringsmetoder (divideres tallene i tabellen med 3600 fås energitætheder i kWh/kg, henholdsvis kWh/l).

Karakteristika	På kort sigt			På mellemlangt sigt			På langt sigt	
	Pumpe- vand- kraft- lager lager	Tryk- luft- lager	Bly- batterier	Avance- rede batterier	Sving- hjul	Brint- lager	Supralede- Spoler	
Kommercielt tilgængelig hvornår?	Nu	Nu	Nu	1985- 2000	1985- 2000	1985 2000	Efter 2000	
Forventet lagerenhed (MW eller MWh)	200- 2000 MW	200- 2000 MW	20- 50 MWh	20- 50 MWh	10- 50 MWh	20- 50 MWh	> 2000 MWh	
Typisk Afladningstid (s)	10^4-10^5	10^4-10^5	10^4	10^4-10^5	$1-10^3$	10^4-10^5	$10^{-3}-10^5$	
Anlægsudgift ^{a)} (\$/J)	$7 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}	
Forventet levetid (år)	50	20-25	5-10	10-20	20-25	10-25	20-30	
Effektivitet (%) ^{b)}	70-75	65-75	60-75	70-80	70-85	40-50	70-85	
Konstruktions- tid (år)	8-12	3-12	2-3	2-3	2-3	2-3	8-12	

a) De angivne priser er i 1975\$ og er for hele systemet, heri inkluderet det udstyr, der er nødvendigt for at overføre energien til og fra lageret. Priserne er middeltal af forskellige vurderinger, der typisk svinger med en faktor 2 eller 3 fra de opgivne værdier.

b) Elektrisk energi ud i forhold til elektrisk energi ind.

Tabel 6.2 Forventede tekniske og økonomiske parametre for udvalgte energilagringssystemer. Mallard et al., Proceedings of American Power Conference, Vol 38 (1976) side 1200. Hassenzähl et al.: "Electrochemical, Electrical and Magnetic Storage of Energy", Hutchinson Ross (1981).

Appendix

1. Gassers arbejde

Vi betragter i det følgende en beholder forsynet med et stem-pel og antager, at der i beholderen befinder sig n mol af en ideal gas. Følgelig gælder den fundamentale tilstandsligning

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{A.1})$$

Ved en udvidelse fra voluminet V_1 og trykket p_1 til voluminet V_2 og trykket p_2 er det af gassen udførte arbejde A lig med (jfr. figur 3.7, side 57).

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (\text{A.2})$$

For en isoterm proces gælder der, at

$$\begin{aligned} A &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \left[\ln V \right]_{V_1}^{V_2} \\ &= nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

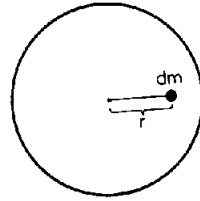
$$= p_2 V_2 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (\text{A.4})$$

I sidste omformning udnyttes, at p og V er omvendt proportionale ifølge tilstandsligningen (A.1).

2. Rotationsenergi i et svinghjul

Vi ser på et svinghjul med radius R og masse M . Hjulet roterer med vinkelhastigheden ω .

En massedel dm i afstanden r fra centrum har den kinetiske energi

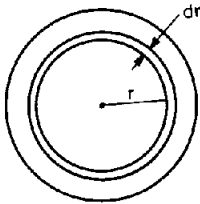
Figur A.1

$$dE_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (r\omega)^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \cdot r^2 \cdot dm \quad (\text{A.5})$$

Hjulets totale kinetiske energi må da være bidragene fra samtlige massedele,

$$E_{\text{kin}} = \int \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot dm = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \int r^2 \cdot dm = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot I \quad (\text{A.6})$$

hvor $I = \int r^2 \cdot dm$ kaldes hjulets intertimitmoment. For at beregne I inddeler vi hjulet i koncentriske cirkler med tykkelse dr .

Figur A.2

Massen dm af en sådan cirkel er $2\pi \cdot r \cdot dr \cdot \bar{\rho}$, hvor $\bar{\rho}$ er massen pr. arealenhed. Heraf fås

$$I = \int r^2 \cdot dm = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot \bar{\rho} \cdot r^3 \cdot dr = 2\pi \cdot \bar{\rho} \cdot \frac{1}{4} R^4 = \quad (\text{A.7})$$

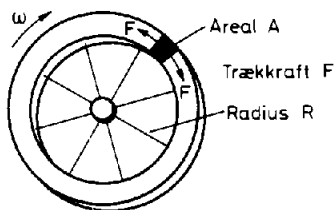
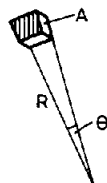
$$\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \bar{\rho} \cdot R^4 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \bar{\rho} \cdot R^2 \cdot R^2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2$$

idet $\pi \cdot R^2 \cdot \bar{\rho}$ er lig med hjulets samlede masse. Heraf fås for hele hjulets kinetiske energi

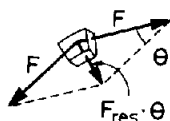
$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{4} \omega^2 \cdot R^2 \cdot M \quad (\text{A.8})$$

3. Spændinger i et svinghjul

Lad os se på et lille udsnit af kransen på et ringformet svinghjul med radius R . Hjulkransens tværsnitsareal kaldes A .

Figur A.3(a)Figur A.3(b)

Under rotationen opstår der tangentielle spændinger, der sikrer den nødvendige centripetalkraft til at opretholde bevægelsen. Kaldet vi de tangentielle kræfters størrelse for F og massetætheden for ρ , har vi følgende billede:

Figur A.4

Den resulterende kraft F_{res} er da

$$F_{\text{res}} = 2F \cdot \sin \frac{\theta}{2} \approx F \cdot \theta$$

da θ er en lille vinkel.

Da kraften i en cirkelbevægelse altid er givet ved $m \cdot R \cdot \omega^2$ har vi

$$A \cdot R \cdot \theta \cdot \rho \cdot R \cdot \omega^2 = F \cdot \theta \quad (\text{A.10})$$

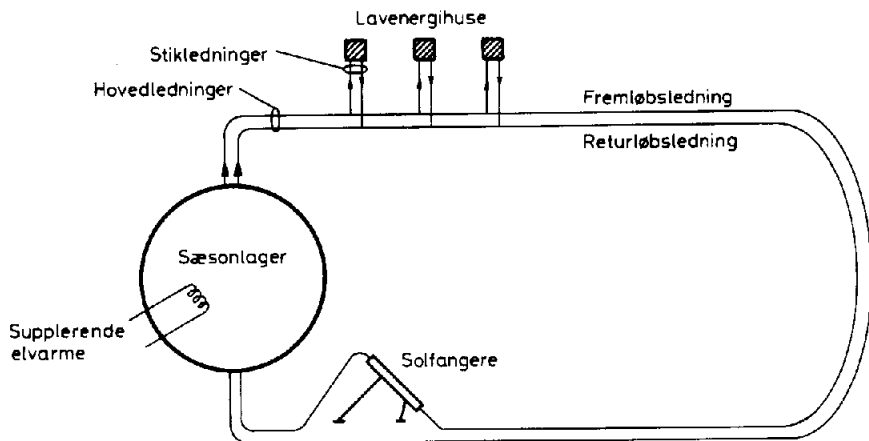
idet m i dette tilfælde er $A \cdot R \cdot \theta \cdot \rho$.

Heraf fås

$$\frac{F}{A} = \rho \cdot R^2 \cdot \omega \quad (\text{A.11})$$

$\frac{F}{A}$ kaldes spændingen og betegnes σ . Dimensionen af σ er altså kraft pr. arealenhed.

I. Sæsonlager i fjernvarmesystem



Introduktion*

En boligforening vil opføre et antal lavenergihuse, der skal forsynes med varme og varmt vand fra et fjernvarmenet. I projektet indgår, at man vil forsøge at dække hele bebyggelsens behov for varme og varmt vand ved hjælp af solenergi. Man beslutter derfor at forbinde fjernvarmenettet med et stort sæsonlager, hvori der gemmes varme fra solfangerne.

Formål med øvelsen

Ud fra nogenlunde realistiske antagelser om forbrugets størrelse, om solfangerenes energiproduktion og om varmetabene fra sæsonlager og fjernvarmeledninger skal vi forsøge at finde frem til et lagervolumen V_{lager} og et solfangerareal A_{sol} , der netop vil kunne dække hele varmebehovet i et gennemsnitsår.

(*) Øvelsen er inspireret af Lars Henrik Nielsens speciale (1981).

Fysisk baggrund

Betragt et tidsrum Δt , hvor sæsonlagerets temperaturstigning (eller temperaturfald) ΔT_{λ} er lille sammenlignet med lagerets middeltemperatur i den pågældende periode (T_{λ}). I denne øvelse vil vi antage, at vi kan sætte $\Delta t = 1$ måned. For en sådan periode kan energibevarelsesligningen udtrykkes som

$$m_{\lambda} \cdot c_{\lambda} \cdot \Delta T = (P_{\text{sol}} - P_{\text{lager}} - P_{\text{net}} - P_{\text{forbrug}}) \cdot \Delta t + E_{\text{el}} \quad (1)$$

$m_{\lambda} \cdot c_{\lambda} \cdot \Delta T$ = tilvæksten i lagerets energi i tiden Δt

P_{sol} = midlet effekttilførsel til lageret fra solfangerne

P_{lager} = midlet effektab fra lageret

P_{net} = midlet effektab fra fjernvarmenettet

P_{forbrug} = midlet varmeforbrug i samtlige huse

E_{el} = nødvendig elvarme for at dække behovet

Forbruget

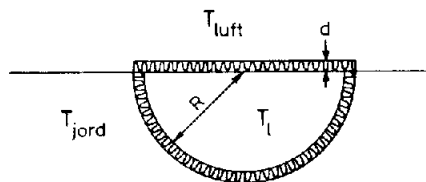
Husene antages at være lavenergihuse (N i alt) med et årligt varmebehov pr. bolig på 9800 kWh (heri medregnet varmt brugsvand). Behovet antages fordelt på årets måneder, som angivet i tabel I.1. I en given måned er $P_{\text{forbrug}} \cdot \Delta t$ altså givet ved:

$$P_{\text{forbrug}} \cdot \Delta t = N \cdot (\text{Energiforbrug pr. hus ifølge tabel I.1}) \quad (2)$$

Husene har gulvvarme, der er således dimensioneret, at fremløbstemperaturen må komme helt ned på $T_{\text{min}} = 35^{\circ}\text{C}$ (den må naturligvis gerne være højere!)*. Undervejs gennem husets rørsystem sænkes temperaturen med 10°C . Altså er

$$T_{\text{retur}} = T_{\text{frem}} - 10^{\circ}\text{C}.$$

(*) Varmt brugsvand, der kun er 35° varmt, er ikke særlig behageligt. I praksis vil man derfor nok bruge f.eks. el eller gas til at bringe brugsvandets temperatur op fra T_{λ} til ca. 50°C . Det vil vi dog undlade her for ikke at gøre opgaven for kompliceret.



Figur I.2

Sæsonlageret antages at være halvkugleformet med radius R og volumen $V = \frac{2\pi}{3} \cdot R^3$. Lageret antages overalt at være isoleret med mineraluld af tykkelsen d og med varmeledningsevne λ (jfr. kapitel 2, afsnit 3).

Lagerets effekttab er da:

$$P_{\text{lager}} = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (T_l - T_{\text{luft}}) + 2\pi R^2 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (T_l - T_{\text{jord}}) \quad (3)$$

Gør rede for dette!

Tab fra fjernvarmenettet

Som figur I.1 viser, består fjernvarmesystemet af to hovedledninger (frem og retur) samt af stikledninger til hvert hus (også både frem og retur). Den samlede længde af hver hovedledning kaldes L_h , den samlede længde af fremløbsstikledninger = returstikledninger = L_s . Det samlede tab fra fjernvarmenettet kan nu skrives:

$$\begin{aligned} P_{\text{net}} \cdot \Delta t = & L_h \cdot k_{\text{net}} \cdot (T_{\text{frem}} - T_{\text{jord}}) + L_h \cdot k_{\text{net}} \cdot (T_{\text{retur}} - T_{\text{jord}}) \\ & + L_s \cdot k_{\text{net}} \cdot (T_{\text{frem}} - T_{\text{jord}}) + L_s \cdot k_{\text{net}} \cdot (T_{\text{retur}} - T_{\text{jord}}) \end{aligned} \quad (4)$$

hvor k_{net} er en konstant, der afhænger af rørdimensioner, isoleringsmateriale og isoleringstykkelser.

Solfangerenes energiproduktion

Solfangerne antages at være sydvendte og danne en vinkel på 60° med vandret. Solindfaldet på 1 m^2 solfanger vil i et dansk gennemsnitsår variere nogenlunde som vist i tabel I.1 (men udsving på 20-30% i de enkelte måneder forekommer hyppigt).

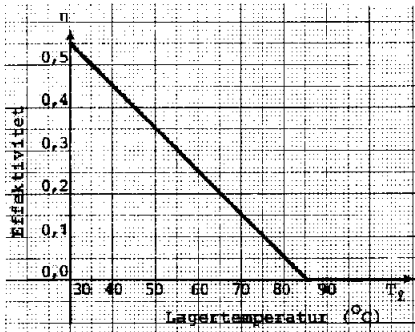
Solfangerne fungerer som bekendt bedst, når indløbstemperaturen (i projektet det samme som returtemperaturen, jvf.

figur I.1) er lav. Bliver indløbstemperaturen i solfangeren høj, vil næsten al den solenergi, der træffer solfangeren, gå tabt til omgivelserne. Vi skal her antage, at de benyttede solfangere kan omsætte brøkdelen η af solindstrålingen til nyttig energi i lageret, og at η varierer med lagertemperaturen T_ℓ som vist i tabel I.2.

Den månedlige, nyttiggjorte solenergi er altså

$$P_{\text{sol}} \cdot \Delta t = A_{\text{sol}} \cdot \eta \text{ (fra figur I.3)} \cdot (\text{solindfald fra tabel I.2})$$

(5)



Figur I.3 Solfangernes nytte-virkning η som funktion af lagertemperaturen T_ℓ .

Parameter	Symbol	Værdi
Antal huse	N	100
Lagerets Volumen	V_{lager}	30000 m ³
Lagerets isolering :20 cm mineraluld; $\lambda=0,04$ W/(m·K)	λ d	0,20W/(m ² ·K)
Lagerets minimale temperatur= minimalt tilladte fremløbs-temperatur	T_{min}	35°C
Jordens temperatur (hele året)	T_{jord}	8°C
Luftens middeltemperatur	T_{luft}	se tabel I.2
Hovedledningens samlede længde	L_h	1000 m
Stikledningens samlede længde	L_s	1000 m
Varmetabskoefficient fra ledningsnettet	k_{net}	0,35 W/(m·k)
Fremløbstemperatur overalt:	$T_{\text{frem}} = T_\ell$	
Returløbstemperatur overalt:	$T_{\text{retur}} = T_\ell - 10^\circ\text{C}$	

Tabel I.1 Inputværdier i model for sæsonlager + fjern-varmesystem.

Måned	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
Forbrug pr.bolig (kWh/md)	1300	1215	1165	895	480	400	400	400	450	815	1050	1230
Solindfald pr.m ² solf. (kWh/m ² .md)	40	65	95	120	140	150	145	135	110	80	55	30
Middeltem- peratur (°C)	-0.1	-0.4	1.7	6.2	11.1	14.5	16.6	16.3	13.1	8.7	4.9	2.2

Tabel I.2 Månedsværdier for forbrug, solindfald og lufttemperatur

Beregninger

Vi forestiller os, at lageret er helt tømt den 1. april, idet lagertemperaturen antages at være 35°C . Vi skal nu forsøge at lave et energiregnskab for hele systemet i det efterfølgende år, som antages at være et gennemsnitsår, vejrmæssigt set (jvf. tabel I.2).

1.

Antag et solfangerareal på 1000 m^2 og et lagervolumen på 30000 m^3 .

2.

Beregn T_{ℓ} ved begyndelsen af hver efterfølgende måned ud fra ligningerne (1)-(5).

NB. Husk at T_{ℓ} ikke må komme under 35°C . Hvis sæsonlageret ikke kan tilfredsstille hele behovet i én eller anden måned, tilføres lageret elvarme i fornødent omfang.

3.

Opstil et energiregnskab for projektet i en 12-måneders periode.

4.

Forøg solfangerarealet med 1000 m^2 og gå tilbage til punkt 2. Fortsæt indtil solfangerarealet er lig med 5000 m^2 . Hvad er det mindste solfangerareal, der netop giver fuldstændig dækning af behovet hele året?

5.

Gentag beregningerne med både et mindre lager ($V_{\text{lager}} = 20000 \text{ m}^3$) og et større lager ($V_{\text{lager}} = 40000 \text{ m}^3$). Find også her det mindste solfangerareal, som giver fuld dækning.

6.

Vi har nu fundet tre værdier af $(V_{\text{lager}}, A_{\text{sol}})$, som netop giver fuld dækning af varmebehovet i et normalår. Såfremt solfangere koster 2000 kr/m^2 og sæsonlageret koster 200 kr/m^3 , hvilket projekt er da det mest fordelagtige, økonomisk set? Sammenlign anlægspris for sæsonlager og solfangere med værdien af den sparede elektricitet i 1 år, når 1 kWh antages at koste 75 øre.

Advarsel: Vi vil kraftigt understrege, at de angivne økonomiske talværdier kun må opfattes som meget grove retningspile. Øvelsen må altså ikke benyttes som grundlag for at drage forhastede konklusioner om økonomien i et praktisk sæsonlagerprojekt.

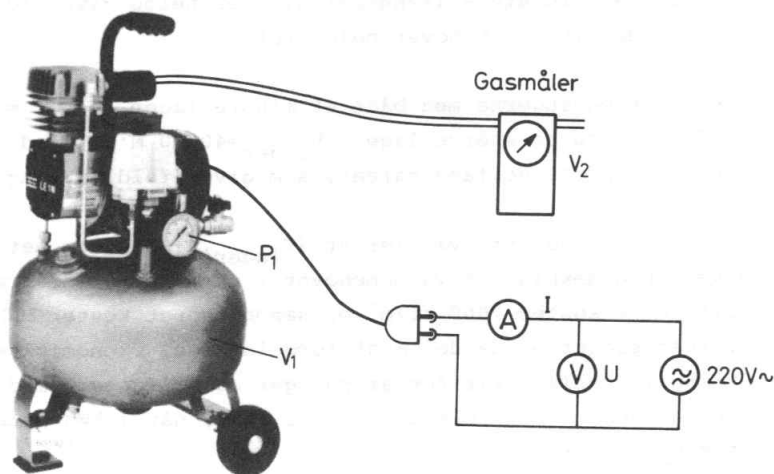
II. Trykluftlagring

Formål

At undersøge, hvor stor en del af en tilført elektrisk energimængde, der lagres som trykluft-energi på et transportabelt trykluftanlæg.

Udstyr

På mange skoler findes et lille transportabelt trykluftanlæg - ellers kan det lejes. Herunder er vist et foto af en måleopstilling:



Figur II.1

Foruden kompressor med beholder og trykmåler benyttes et volt-meter (220 V~), et amperemeter, et ur, et barometer og evt. en gasmåler eller et airflowmeter. (Sidstnævnte måleinstrumenter benyttes til at bestemme rumfanget af den luft, der pumpes ind i beholderen. De kan dog undværes, idet dette rumfang kan beregnes fra beholderens rumfang og sluttryk).

Måleprocedure

Under øvelsen bestemmes dels elmotorens og dels kompressorens virkningsgrad.

Elmotorens virkningsgrad findes som forholdet mellem motorens afleverede energi E_{mek} (kan let findes ud fra motorspecifikationerne) og den el-energi E_{el} , som tilføres motoren. E_{el} beregnes ud fra formlen $E_{el} = I \cdot U \cdot t \cdot \cos\phi$, hvor I er middelstrømstyrken, U er spændingen, t er tiden og $\cos\phi$ er en fasefaktor, der ofte kan aflæses på motorspecifikationerne. E_{el} kan dog også måles direkte, hvis man benytter en almindelig el-måler (et Joulemeter).

Under trykluftbeholderens fyldning måles altså middelspændingen U og middelstrømstyrken I samt fyldningstiden t .

Den beregnede virkningsgrad $\eta = E_{mek}/E_{el}$ står undertiden angivet på motorspecifikationerne. For små motorer er η ofte omkring 60%.

Kompressorens virkningsgrad findes som forholdet mellem den lagrede trykluftenergi E_{tryk} og den mekaniske energitilførsel fra motoren E_{mek} . Med betegnelserne i figur II.1 kan E_{tryk} beregnes fra formel (3.5), side 58:

$$E_{tryk} = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln(P_1/P_{atm}) - P_{atm} \cdot (V_2 - V_1)$$

P_1 og V_1 er trykbeholderens sluttryk og rumfang, V_2 er rumfanget af den indstrømmede luftmængde og P_{atm} er barometerstanden. (Pas på enhederne!). Kompressorens virkningsgrad afhænger af kompressorens konstruktion, kompressorens arbejds hastighed og den relative trykforøgelse. Benyt de to virkningsgrader til at bestemme den samlede virkningsgrad, dvs. hvor stor en del af den tilførte el-energi, der er lagret som trykluft-energi. Hvad bliver resten til?

ØVELSE II

Måleserie

Udfør en serie målinger, hvor kompressoren stoppes ved forskellige sluttryk og undersøg, hvordan kompressorens virkningsgrad afhænger af sluttrykket. Lav en graf over kompressoreffektiviteten som funktion af sluttrykket.

Prøv at gætte på kurvens forløb, inden du måler og give en forklaring på, hvorfor du tror, den forløber sådan. Undersøg så, om dit ræsonnement var rigtigt.

III. Gudenåcentralen

Gudenåcentralen (Tangeværket) er et dansk kraftværk, der udnytter den potentielle energi i et højtliggende vandreservoir til elproduktion. Værket er opført i årene 1918-21, og det ligger for enden af en 6,25 km² stor kunstig sø (Tangesø) ved Gudenåen.



Figur III.1 Tangeværket ved Gudenåen i Midtjylland.

Denne øvelse er delt i to dele, en praktisk del og en teoretisk del, hvor den praktiske del specielt henvender sig til dem, der vil aflægge besøg på selve Gudenåcentralen. Den teoretiske del af øvelsen er derimod for alle.

ØVELSE III

Praktisk øvelse om Gudenåcentralen

Formålet med denne øvelse er:

- A. At bestemme effektiviteten af Gudenåcentralens omsætning af vandets potentielle energi til el-energi.
- B. At bestemme frekvensen af den vekselstrøm, der sendes ud på nettet.

A. Effektiviteten.

1. Først bestemmes den vandmængde ($\frac{\Delta m}{\Delta t}$), der passerer centralen pr. sekund. Mål bredden og dybden (ca. $\frac{1}{2}$ m) af åen bag værket. Bestem med stopur, hvor lang tid det tager for en skumflage at bevæge sig et udmålt stykke på bredden. Nu kan vandmængden pr. sekund beregnes. Den bør angives i kg/s.
2. Bestem på en eller anden måde højdeforskellen h i meter mellem vandfladerne på hver side af værket - men fald ikke i vandet! Vandets afleverede energi pr. sekund, altså effekten, kan nu beregnes ved hjælp af formlen $P_v = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot g \cdot h$, hvor g er tyngdeaccelerationen. Bruger man de rigtige enheder, får man effekten i J/s=Watt.
3. På kontrolbordet i rummet over maskinhallen kan man direkte aflæse den elektriske effekt P_{el} , der sendes ud til forbrugerne. Man kan også aflæse spænding U_3 og strøm I_3 af den trefasede vekselstrøm, der sendes ud. Gælder

$$P_{el} = U_3 \cdot I_3 \text{ for trefaset vekselstrøm?}$$

Nu kan værkets effektivitet findes som den procentdel af vandets afleverede effekt P_v , der sendes ud som el (P_{el}). Hvor stor bliver denne effektivitet? Hvad bliver der af den resterende del af vandets afleverede effekt?

De nederste instrumenter på kontrolbordet viser den strøm I_m og spænding U_m , der benyttes til magnetisering af dynamomagneterne. Da magnetiseringsstrømmen er jævnstrøm, gælder $P_m = U_m \cdot I_m$, og man kan således bestemme hvor stor en del af elproduktionen, der bruges til magnetisering. Gør dette! Hvor sidder varmeapparaterne i hallen?

B. Frekvensen.

1. Tæl antallet af magneter på en af rotorerne. Magneterne

har skiftevis nord- og sydpol mod statoren (den del, der ikke roterer).

- Bestem antal omløb pr. sekund på én eller anden god måde. Nu kan netfrekvensen beregnes som det antal gange pr. sekund, et punkt på statoren passerer af en nordpol.

Teoretisk øvelse om Gudenåcentralen

Ved Gudenåcentralen har man målt følgende sammenhæng mellem faldhøjden (h) og den gennemstrømmede vandmængde pr. sek. ($\frac{\Delta m}{\Delta t}$).

$\frac{\Delta m}{\Delta t}$ (kg/s)	12.500	22.500	32.500	42.500	52.500
h (meter)	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0

- Bestem h som funktion af $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ og kommenter denne sammenhæng. Den effekt, vandet yder ved sit fald gennem turbinerne, er $P_v = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot g \cdot h$.

- Bestem det teoretiske maximum for P_v og kommenter resultatet.

Man har målt følgende elektriske effekt fra værket ved forskellige faldhøjder:

h (meter)	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
P_e (MW)	3,4	2,8	2,2	1,6	1,0

Afbild P_e som funktion af h .

- Bestem P_e som funktion af $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ og tegn en graf over denne sammenhæng.
- Bestem effektiviteten $\eta = \frac{P_e}{P_v}$ som funktion af $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ og tegn grafen.
- Bestem værkets minimale og maksimale effektivitet i det udnyttede strømningsinterval: $12500 \text{ kg/s} \leq \frac{\Delta m}{\Delta t} \leq 52500 \text{ kg/s}$.
- Værket passerer årligt af $600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ vand. Benyt denne oplysning samt tallene fra afsnit A til at vurdere årsproduktionen af el. (Den er omkring $10 \cdot 10^6 \text{ kWh}$). Hvor mange procent er det af landets samlede el-produktion? Find eventuelt elforbruget til vejbelysning i Århus Amt og sammenlign.

ØVELSE III

7. Gudenåen over centralen afvander 1700 km^2 og gennemsnitsnedbøren over Danmark er 626 mm om året. Hvor stor en procentdel af nedbøren på de 1700 km^2 passerer værket? Forestiller man sig hypotetisk, at hele Danmark dækkes med vandkraftværker, der udnytter regnen lige så godt som Gudenåcentralen, hvad bliver da den totale elproduktion herfra? Kunne vi i givet fald sælge elektricitet til udlandet?

IV. Kapacitor og induktor

Baggrund

Vi skal i dette forsøg omsætte lagret elektrisk (magnetisk) energi til potentiel energi. Metoden består i at aflade en kapacitor (induktor) gennem en elektromotor, som derved drejer rundt og hæver et lod stykket Δh i tyngdefeltet. Idet vi kalder motorens virkningsgrad* for η , vil højdeforskellen Δh kunne bestemmes af følgende simple energibevarelsesligninger (jfr. kapitel 3 og 4):

$$\eta \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2\right) = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (\text{kapacitortilfældet}) \quad (1)$$

$$\eta \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2\right) = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (\text{induktortilfældet}) \quad (2)$$

For de små motorer, vi møder i skolens fysiklaboratorium, vil virkningsgraden altid være meget mindre end 1 (10-15% er typisk). Første trin i øvelsen består derfor i at måle virkningsgraden for den benyttede motor. Andet trin er en måling af sammenhængen mellem kapacitorens energiindhold og tilvæksten i loddets potentielle energi, jfr. ligning (1). Tredie trin er en tilsvarende måleserie, hvor kapacitoren blot er byttet ud med en induktor.

Udstyr (talværdierne er kun vejledende)

1 kapacitor (kapacitans $C = 10 \text{ mF}$)

1 induktor (induktans $L = 1 \text{ H}$)

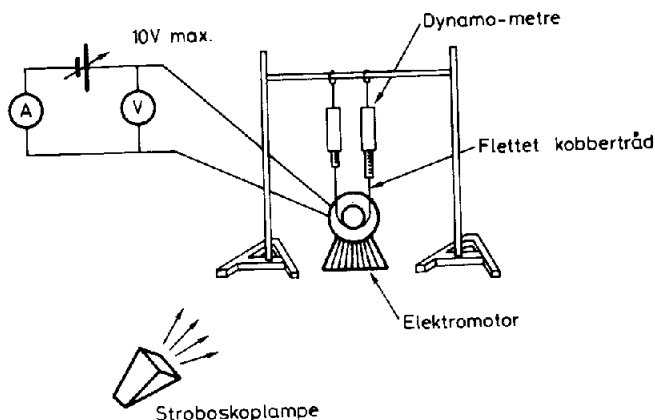
(*) Virkningsgraden η er defineret som $\eta = \frac{\text{mekanisk energi ud}}{\text{elektrisk energi ind}}$
 For alle virkelige motorer er $\eta < 1$, fordi noget af den elektriske energi, der tilføres motoren, bliver til varme i lejer og vindinger.

ØVELSE IV

- 1 elektromotor (f.eks. Maphy-motor, max 8V)
- 1 lod (masse $m = 10\text{ g}$)
- 2 dynamometre
- 1 stroboskoplampe med variabel frekvens
- 1 stk. snoet kobbertråd
- Variabel spændingsforsyning
- Voltmeter, Amperemeter, stativer

A. Måling af motors virkningsgrad (jfr. Leybold, Sept. 1971)

Opstilling



Figur IV.1 Skitse af forsøgsopstilling.

Princip

Motoren spændes godt fast og stativets højde reguleres indtil kobbertråden strammer omkring motorens akse. De to dynamometre F_1 og F_2 aflæses. Når motoren startes, udsættes den for en bremsende kraft p.g.a. gnidning mod kobbertråden og bremsekraften F_b aflæses som forskellen $F_2 - F_1$. Den af motoren afleverede effekt er da $P_{ud} = F_b \cdot v$, hvor v er hastigheden af et punkt på akseperiferien. Kaldes aksens radius r , bliver $v = 2\pi r \cdot \nu$, hvor ν er motorens omdrejningstal. Omdrejningstallet måles let ved at anbringe et lille mærke på motoraksen, inden motoren startes. Derefter startes motoren op og frekvensen reguleres på en stroboskoplampe, indtil mærket synes at stå stille. Motorens virkningsgrad er så bestemt af ligningen

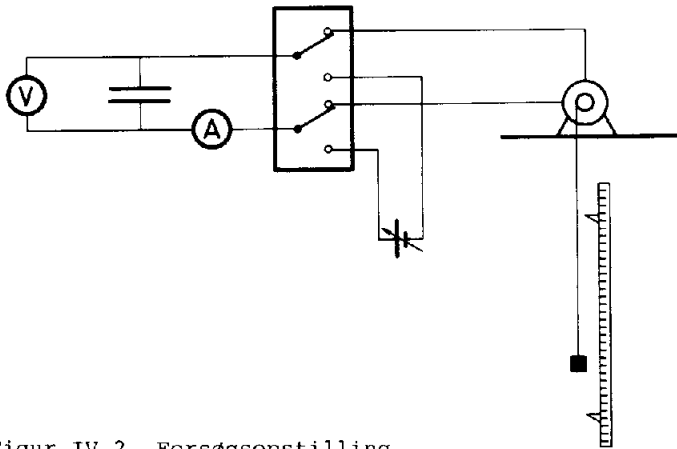
$$\eta = \frac{P_{ud}}{P_{ind}} = \frac{F_b \cdot 2\pi r \cdot v}{U \cdot I}$$

Måleserie

Mål motorens virkningsgrad som funktion af U ved at gennemføre forsøget ved en række forskellige U -værdier i intervallet 0-8 V.

Afsæt resultaterne i et (U, η) -koordinatsystem.

B. Elektrisk energi til potentiel energi



Figur IV.2 Forsøgsopstilling

Måleprocedure

Indstil den variable spændingsforsyning, så voltmetret viser, at der er 1 V over kapacitoren. Via omkobleren aflades kapacitoren gennem motoren, og højdeændringen Δh aflæses. Lav målingerne 3-4 gange for at opnå en god bestemmelse af Δh . Gentag målingerne ved f.eks. 2, 3, 4, 5, 6 og 7 Volt. Afsæt resultaterne i et $(\Delta h, U^2)$ -koordinatsystem. Kommenter resultaterne.

C. Magnetisk energi til potentiel energi

Opstilling

Som i B, men kapacitoren skiftes ud med en induktor.

ØVELSE IV

Måleprocedure

Indstil den variable strømforsyning således, at amperemetret viser f.eks. $I = 0,5 \text{ A}$ (effekten, der afsættes i spolen er $U \cdot I$ Watt - sørg for ikke at overskride den maksimale effekt, som spolen kan tåle!)

Forsøg nu at aflade spolen gennem motoren ved at skifte omkoblerens position. Ifølge ligning (2) skulle loddet hæves et pænt stykke, men det sker ikke! Beregn hvor højt loddet burde hæves og find ud af, hvor energien er blevet af!

V. Blyakkumulatoren

Vi har valgt at behandle blybatteriet som en regneøvelse, da der er flere praktiske vanskeligheder med at vedligeholde og måle på blybatterier.

Imidlertid håber vi, at øvelsen kan inspirere nogle til at eksperimentere med blybatterier, f.eks. i et valgfrit emne. Små blyakkumulatorer til knallerter eller motorcykler kan købes billigt hos en forhandler for under 100 kr. Øvelsen er delt i 3 uafhængige opgaver, hvor den første er den korteste.

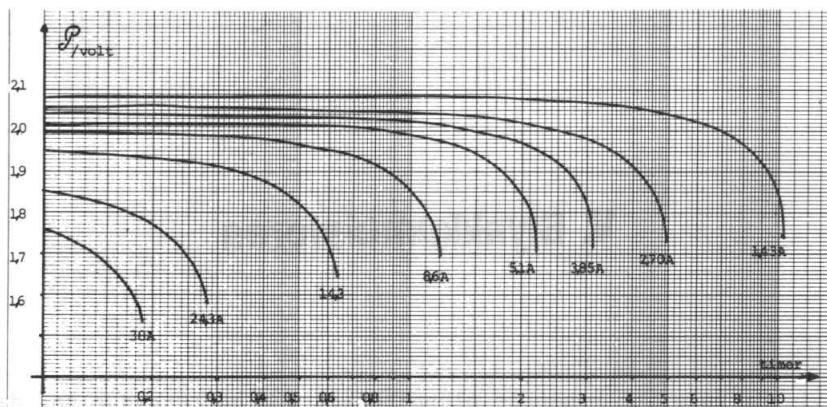
A. Blybatteriets kapacitet

Det viser sig, at et batteris kapacitet afhænger af, hvor hurtigt det aflades. Jo langsommere afladningen foregår, jo større er kapaciteten. Normalt angiver varedeklarationen kapaciteten ved en afladning over 10 timer.

Benyt afladningskurverne side 134 til at finde kapaciteten i amperetimer (Ah) for en akkumulatorplade ved forskellige afladningsstrømme. Sluttidspunktet for afladningen findes, hvor kurven går stejlt nedad.

1. Beregn kapaciteten for hver afladningsstrøm og afbild kapaciteten som funktion af afladningsstrømmen.
2. Hvor mange af disse plader er der i en akkumulatorcelle med en angivet kapacitet på 100 Ah?
3. Hvad bliver energiindholdet i en akkumulatorcelle på 100 Ah?

ØVELSE V



Figur V.1 Afladningskurver for én plade i en blyakkumulator. Kilde: A/S Akkumulatorfabrikken Lyac.

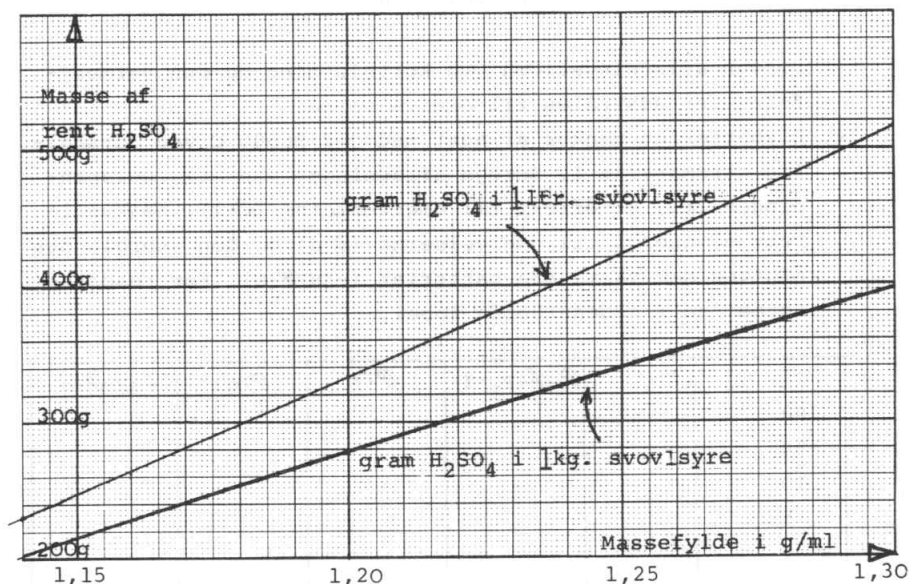
B. Stofomsætningen i et blybatteri

Under afladning af et blybatteri forløber flg. bruttoproces, når 2 mol elektroner = $2 \cdot 96500 \text{ C}$ passerer fra den negative til den positive pol:



1. Beregn den mængde svovlsyre, der forbruges og den mængde vand, der dannes, når batteriet aflades med $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$. En akkumulatorcelle på 100 Ah består af 6 plader med hver 133 g PbO_2 (desuden består det af 7 plader af Pb).
2. Hvor stort et overskud af PbO_2 er der?
Det samme batteri antages at indeholde $1,70$ liter svovlsyre med en massefylde på $1,280 \text{ kg/liter}$, når det er fuldt opladet. Vi tænker os, at det aflades med 100 Ah og vil nu beregne ændringen i massefylden ved hjælp af graferne side 135 (figur V.2).
3. Find massen af rent H_2SO_4 i de $1,70$ liter svovlsyre før afladningen.
4. Find massen af rent H_2O før afladningen.
5. Beregn masseændringen af H_2SO_4 og H_2O , når 100 Ah er afladet.
6. Udregn masserne for H_2SO_4 og H_2O efter afladningen.

- Find massen af H_2SO_4 i 1 kg svovlsyreopløsning og find massefylden af svovlsyren ved hjælp af grafen.
- Ved hjælp af en tabel over akkumulatorvæskens massefylde kan automekanikeren få et skøn over akkumulatorens lade-tilstand. Tabel 5.5, side 102 viser en sådan. Hvordan passer den med dine regninger?



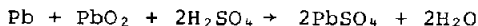
Figur V.2 Masse af ren H_2SO_4 som funktion af massefylden.

C. Blybatteriets termodynamik

- Bestem blybatteriets polspænding $\mathcal{P}$ ved afladningens begyndelse (efter 0,1 times afladning) for de forskellige afladningsstrømme ved aflæsning på figur V.1.
- Afbild polspændingen $\mathcal{P}$ som funktion af strømstyrken I . Da punkterne tilnærmelsesvis ligger på en ret linie, kan vi benytte en simpel model for blybatteriet. Blybatteriet kan opfattes som en serieforbindelse af en elektromotorisk spænding $\mathcal{E}$ og en indre modstand R_i . Indtegn den bedste rette linie og bestem $\mathcal{E}$ og R_i fra grafen. Bestem også kortslutningsstrømmen I_k . Opskriv et matematisk udtryk for sammenhængen mellem R_i og I .

ØVELSE V

3. Ved kortslutning udvikles ingen nyttig energi til omgivelserne, men man har målt, at en blyakkumulator udvikler 395 kJ som varme, når den aflades med 2 faraday = 2 mol elektroner = 2 · 96500 C. De 395 kJ er altså netop værdien af $-\Delta H$ for processen:



Beregn afladningstiden ved kortslutning og den varmeeffekt, der udstråles til omgivelserne.

4. Blybatteriet tænkes afladet med $q = 2 \cdot 96500$ C ved forskellig strømstyrke I . Beregn afladningstiden (t), polspændingen ($\mathcal{P}$), el-effekt til omgivelserne ($\mathcal{P} \cdot I$), højkvalitets el-energi til omgivelserne ($\mathcal{P} \cdot q$) og den energi, der afgives som varme fra batteriet ($-\Delta H - \mathcal{P} \cdot q$). Følg resultaterne ind i nedenstående tabel.

I	t	$\mathcal{P} = \mathcal{E} - R_i \cdot I$	$\mathcal{P} \cdot I$	$\mathcal{P} \cdot q$	$-\Delta H - \mathcal{P} \cdot q$
100					
50					
10					
5					
1					
0,1					
0	∞				

Bestem den maximale mængde højkvalitetsenergi (i sidste linie), som man ifølg. modellen kan få ud af batteriet. Det svarer til $-\Delta G$ for processen.

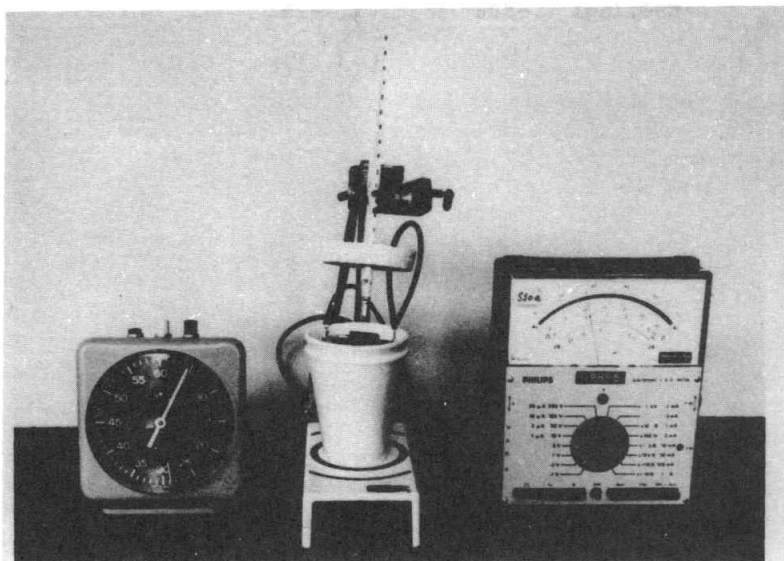
5. De fundne værdier af ΔH og ΔG for processen er ikke helt identiske med dem, man kan beregne ud fra tabelværdier, da tabelværdierne svarer til rene stoffer (eller 1 molære opløsninger). I blybatteriet har vi imidlertid en ca. 37% svovlsyre, svarende til en 4,9 molær opløsning. Beregn ΔH° og ΔG° for to processer med hhv. ren svovlsyre og 1 molær svovlsyre, idet følgende oplysninger benyttes:

Ren svovlsyre: $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

1 molær " : $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}^+ + \text{HSO}_4^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

	$H^\circ / (\text{kJ/mol})$	$G^\circ / (\text{kJ/mol})$
Pb	0	0
PbO ₂	-277,4	-217,4
H ₂ SO ₄	-814,0	-690,1
PbSO ₄	-919,9	-813,2
H ₂ O	-285,8	-237,2
H ⁺ (aq)	0 (def.)	0 (def.)
HSO ₄ ⁻ (aq)	-886	-753

VI. Nickel-cadmium batteriet



Figur VI.1 Foto af forsøgsopstilling

Formål

At bestemme ΔG og ΔH for bruttoprocessen i en NiCd-celle ved at måle den elektromotoriske spænding ($\mathcal{E}$) og energiafgivelsen som varme (Q), når NiCd-cellen aflades i et kalorimeter. Desuden bestemmes NiCd-cellens kapacitet og energiindhold.

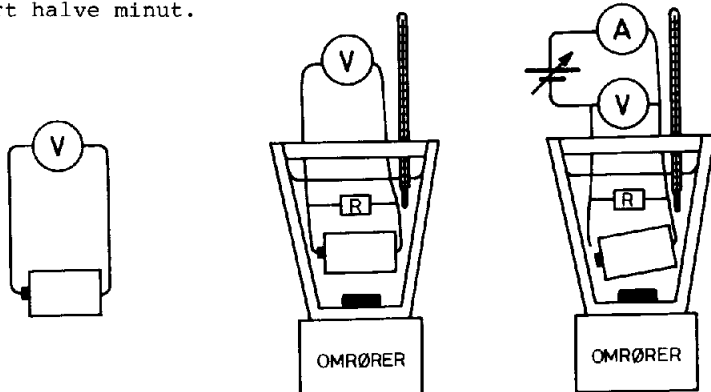
Udstyr

På markedet findes forskellige fabrikater af genopladelige batterier, som er grundlaget for denne enkle øvelse. F.eks.

sælger Varta NiCd-celler i mange forskellige størrelser med genoplader. Øvelsens beskrivelse svarer til batterier med en kapacitet på 1,8 Ah, hertil fås genoplader til 4 batterier. Desuden benyttes et dobbelt polystyren-kaffebæger som kalorimeter (forsynes evt. med polystyren låg), en keramisk modstand på 0,1 ohm loddet til nogle tykke tilledninger, som vist på billedet. Endelig et godt voltmeter, et ur, termometer, evt. magnetomrører, amperemeter og strømforsyning.

Måleprocedure

1. Først måles den elektromotoriske spænding $\mathcal{E}$ med et godt voltmeter.
2. Dernæst fyldes kalorimeteret med 100 ml vand. Batteriet tilsluttes hurtigt modstanden på 0,1 ohm (evt. ved hjælp af et gummibånd, se figur) og sænkes ned i vandet, der holdes omrørt. Man aflæser vandets temperatur og batteriets polspænding hvert halve minut, indtil den er faldet til ca. 0,3 volt.
3. Batteriets ene tilledning fjernes. Kalorimeteret tømmes og fyldes igen med koldt vand. Det afladene batteri samt modstanden sænkes igen ned i kalorimetret og man afventer temperaturligevægt. Når temperaturen er stabil, ledes en strøm på ca. 10 ampere gennem modstanden. Strømmen holdes konstant i ca. 5 minutter og vandet holdes godt omrørt. Man måler spændingen og temperaturen af vandet hvert halve minut.



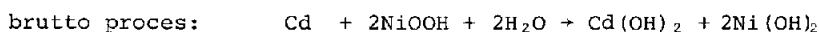
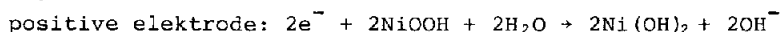
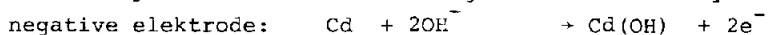
Figur VI.2 (1) Bestemmelse af den elektromotoriske spænding.

(2) Afladning af elementet

(3) Tilledning af strøm

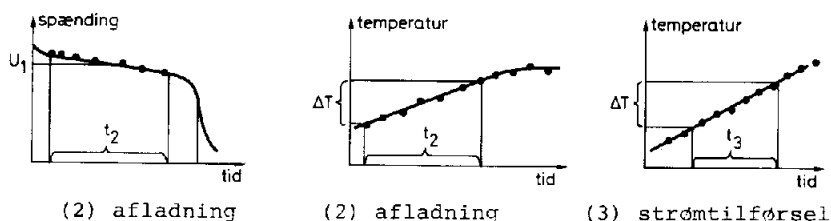
Resultatbehandling

1. Elektrodeprocesserne ved afladning af NiCd-cellen lyder:



Vi ser, at der overføres 2 mol elektroner mellem elektroderne, når 1 mol Cd forbruges. Vi kan derfor finde ΔG fra formelen: $\Delta G = -z \cdot 2 \cdot 96500 \text{ C}$.

2. Afbild spændingen som funktion af tiden under afladningen, og temperaturen som funktion af tiden i de to tilfælde (2) og (3).



Figur VI.3

Vælg et tidsrum t_2 , hvor spændingen kun falder lidt, og find gennemsnitsspændingen U_2 i dette tidsinterval. Benyt derefter den retlinede udjævnete graf over temperaturen under afladning til at finde temperaturstigningen ΔT i samme tidsinterval t_2 . Bestem endelig tidsintervallet t_3 på grafen over temperaturstigning ved ydre strømtilførsel, som svarer til samme stigning i temperaturen ΔT . Se graferne.

I tidsrummene t_2 og t_3 frigøres samme energi som varme i kalorimeteret, dvs:

$$-\Delta H \cdot n_2 = U_3 \cdot I_3 \cdot t_3$$

U_3 og I_3 er spænding og strøm under den ydre strømtilførsel og n_2 er den stofmængde Cd, der omsættes ved afladningsprocessen i tidsrummet t_2 . Da der omsættes 2 mol elektroner, hver gang der omsættes 1 mol Cd fås følgende sammenhæng mellem ladning $I_2 \cdot t_2$ og moltallet n_2 :

$$I_2 \cdot t_2 = n_2 \cdot 2 \cdot 96500 \text{ C}$$

hvor I_2 er gennemsnitsstrømstyrken under afladningen i tidsrummet t_2 .

Man får da:

$$\Delta H = - \frac{U_3 \cdot I_3 \cdot t_3}{n_2} = - \frac{U_3 \cdot I_3 \cdot t_3}{I_2 \cdot t_2} \cdot 2 \cdot 96500 \text{ C}$$

Da $U_2 = I_2 \cdot R$ og $U_3 = I_3 \cdot R$, hvor R er afladningsmodstanden, får man ved forlængelse med R i både tæller og nævner:

$$\Delta H = - \frac{U_3^2 \cdot t_3}{U_2 \cdot t_2} \cdot 2 \cdot 96500 \text{ C}$$

De målte værdier indsættes og ΔG og ΔH beregnes. De beregnede værdier sammenlignes derefter med dem, man får, når man udregner ΔH og ΔG for processen ved at benytte flg. tabelværdier:

	$H^\circ / (\text{kJ/mol})$	$G^\circ / (\text{kJ/mol})$
CD	0	0
$\text{Ni}(\text{OH})_2$	-538,1	-453,1
NiOOH	-392,3	-326,8
$\text{Cd}(\text{OH})_2$	-557,6	-470,5
H_2O	-285,8	-237,2

Til slut beregnes den ladning, som batteriet har afgivet: Man benytter resultatet under (3) til at bestemme afladningsmodstandens størrelse ($R = U_3 / I_3$) og herefter bestemmes gennemsnitsstrømmen under afladningen som $I_2 = U_2 / R$. På grafen over spændingen under afladningen kan man nu finde det tidspunkt, hvor spændingen falder brat (omkring 1 V). Her er batteriet afladet. Kaldes tidsrummet, det tager at aflade batteriet for t_4 , fås for ladningen: $q = I_2 \cdot t_4$. Denne værdi sammenlignes med batteriets påtrykte værdi.

Energiindholdet beregnes som $U_2 \cdot I_2 \cdot t_4$. Divideres denne værdi med batteriets masse kan man finde energitætheden og sammenligne med tabel 5.6, side 103.

Markedsundersøgelse

Har man lyst og tid dertil, kan man på tilsvarende vis undersøge en række primærbatterier (tørelementer). Man må blot være opmærksom på, at den indre modstand i disse batterier gerne er en faktor 10 til 100 gange større, hvorfor afladningen forgår tilsvarende langsommere. I disse tilfælde kan man med fordel benytte en skriver og et elektrisk termometer under målingerne. De genopladelige NiCd-cellers lave indre modstand gør dem absolut mest velegnede til elevøvelser.

9. Litteraturliste

Kapitel 1

Danmarks Energibalance (1979), Udgives årligt af Danske El-værkers Forenings Udredningsafdeling (DEFU) og Dansk Kedelforening.

G. Christensen og S. Blegaa (1979): "Some Properties of a Danish Power System Comprising Wind Energy Generators, Solar Cells and Storage Systems", Fysisk Laboratorium III Dth.

Energiplan 81, Udgivet af Energiministeriet, november 1981.

M.K. Hubbert, (1969): "Energy Resources" i Resources and Mann, W. Freeman and Company.

F. Kalbhammer (1979): "Energy Storage", Scientific American, 1979.

P. Martinsen og H. Nielsen (1981): "Globale Energiperspektiver", F&K Forlaget.

Solvarme (1980): "Solvarme, vejledning i projektering og udførelsen af anlæg", Teknologisk Institut, Tåstrup.

B. Sørensen (1979): "Renewable Energy", Academic Press.

Kapitel 2

F. Bason og H. Nielsen (1981): "Solenergi og Solvarmeanlæg", F&K Forlaget.

S. Furbo (1979): "Varmelagring ved Solvarmeanlæg", Materialenyt nr. 1, 1978.

J. Jensen, m.fl. (1981): "Teknisk/økonomisk analyseprojekt angående udnyttelse af vedvarende energi i større eksisterende fjernvarmesystemer", Laboratoriet for Energiforskning, Odense Universitet.

K. Norbäck och H. Hallenberg (1980): "Swedish group solar heating plant with seasonal storage. Technical-economic description of the Lambohov project", D36:1980, Byggeforskningsrådet, Stockholm.

O. Rathmann (1978): "Måske kan man snart lagre solens varme i jorden", i "Energilagring", særtryk af Ingeniøren, 1978.

J. Reffstrup (1980): "Lagring af varmt vand i undergrunden", Sletten 10, nr.24.

R. Roseen og B. Peress (1980): "Solvärmecentralen i Studsvik",

Studsvik/EL-79/163, Studsvik Energiteknik AB
Solvarme (1980): "Solvarme, vejledning i projektering og udførelse af anlæg", Teknologisk Institut, Tåstrup.

Kapitel 3

- H.P. Buchwald (1980): "Hybridbus - genvinding af bremseenergi", Sletten 10, nr. 24.
J. Jensen (1979): "Energy Storage", Newnes-Butterworth.
McMullen et al. (1976): "Energy Resources and Supply", J.Wiley.
R.F. Post and S.F. Post (1973): "Flywheels", Scientific American, December 1973.

Kapitel 5

- J. Skyum (1980) "Affaldstræ inden for jordbruget", Landhus-holdningesselskabets akademiråds seminar vedrørende alternativ energi i jordbruget, Byggecentrum, Middelfart, 31. marts-1.april 1980, pp. 8.1-8.10.
H. Have (1980): "Landbrugsaffald som energikilde - ressourcer, konverteringsmuligheder og optimal anvendelse", pp. 7.1-7.13 i ref.1.
J. Jensen (1979): "Systematisk oversigt over forskellige lagringssystemer", Dansk Selskab for Materialprøvning og -forskning. Materialnyt nr.1 (1979), pp. 15-39.
J.R. Rostrup-Nielsen (1981): "Nye anvendelser af naturgas via Steam Reforming Processen", Dansk Kemi 1 (1981), pp. 6-10.
Energidagen (1977). Laboratoriet for Energiteknik, Red.: P. Sunn Pedersen og Helge Larsen, RE 77-11 (1977), pp. 164.
J. Jensen (1979): "Udvikling af nye el-akkumulatorer og brændselsceller", ibid., pp. 51-66.
J. Jensen (1980): "Energy Storage", Butterworths (1980) pp. 34-43.
J. Jensen and P. McGeehin (1979): "Batteries for Energy Storage in Transport and Stationary Applications", Proc. Int. Conf. on Future Energy Concepts, London, IEE Publ. 171 (1979), pp. 190-194.

FORKORTELSER FOR POTENSER AF 10

E(exa) = 10^{18}	m(milli) = 10^{-3}
P(peta) = 10^{15}	μ (mikro) = 10^{-6}
G(giga) = 10^9	n(nano) = 10^{-9}
M(mega) = 10^6	p(piko) = 10^{-12}
k(kilo) = 10^3	f(femto) = 10^{-15}
	a(atto) = 10^{-18}

OMREGNINGSTABEL FOR ENERGIMÆNGDER (*)

	Joule	kWh	TWyr	toe
1 joule	1	$2,78 \times 10^{-7}$	$3,17 \times 10^{-20}$	$2,23 \times 10^{-11}$
1 kWh(kilowatttime)	$3,60 \times 10^6$	1	$1,14 \times 10^{-13}$	$8,03 \times 10^{-5}$
1 TWyr(Terawattår)	$3,15 \times 10^{19}$	$8,75 \times 10^{12}$	1	$7,04 \times 10^8$
1 toe(ton olie- ækvivalent)	$4,48 \times 10^{10}$	$1,24 \times 10^4$	$1,42 \times 10^{-9}$	1
1 tke(ton kul- ækvivalent)	$2,93 \times 10^{10}$	$8,14 \times 10^3$	$9,29 \times 10^{-10}$	0,654
1 m ³ naturgas indeholder	$3,73 \times 10^7$	10,36	$1,18 \times 10^{-12}$	$8,32 \times 10^{-4}$
1 tønde råolie* indeholder	$6,12 \times 10^9$	$1,70 \times 10^3$	$1,94 \times 10^{-10}$	0,137
1 t Uran indeholder	$8,20 \times 10^{16}$	$2,28 \times 10^{10}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$1,83 \times 10^6$

(*) 1 tønde = 159 liter

Eksempler:

1 kWh = 1 KW i 1 time

= 1000 Watt i 3600 sek.

= $3,6 \times 10^6$ Joule

1 TWyr = 1 TW i 1 år

= 10^{12} W i (365×24×3600) sek.

= $3,15 \times 10^{19}$ Joule

I FYSIK OG ENERGI serien er
tidligere udkommet:

Finn Elvekjær og Henry Nielsen:
Vindenergi og Vindmøller

Frank Bason og Henry Nielsen:
Solenergi og Solvarmeanlæg

Poul Martinsen og Henry Nielsen:
Globale energiperspektiver