

HVERDAGSFYSIK

Hvorfor er der så få elbiler?

Indeholder bl.a.:

- Energiomsætning og nyttevirkning
- Centrale begreber for batterier

Forfatter: Jens Christian Hansen

Redaktør: Søren Storm

Korrekturlæst og faktatjekket af:

Vibeke Axelsen (Egaa gymnasium)

Kim Vedel Pedersen (Nørre Gymnasium)

Margit From

Støttet af: **novo nordisk fonden**

OBS: Dette teorihæfte er supplerende materiale

Indholdsfortegnelse

Definition af et batteri.....	1
Energiformer.....	1
Energiomsætning og nyttevirkning.....	2
Energikvalitet.....	2
Energitæthed.....	3
Centrale begreber for batterier.....	3
Elementer og spændingskilder.....	4
Seriekobling af batterier.....	5
Parallelkobling af batterier.....	5
Batteripakker.....	6
Batteridrevne biler.....	7
Benzindrevne biler.....	7
Relevante links til opgave 6 i elevhæftet.....	8

Definition af et batteri

Først en afklaring. Det vi normalt omtaler som batterier, er i mange tilfælde ikke et batteri, men et element (en celle) som kan opfattes som en mindste byggesten for batterier.

Energiformer

Man opdeler typisk energi i følgende former:

- Mekanisk energi (kinetisk og potentiel energi)
- Elektrisk energi
- Kemisk energi
- Termisk energi (varmeenergi)
- Strålingsenergi
- Kerneenergi (Fissions- og fusionsenergi)

Selvom man i daglig tale siger, at 'man forbruger energi', så mener man egentlig, at man omdanner eller omsætter energi, fra en af de nævnte energiformer, til én eller flere af de andre energiformer.

I et isoleret system kan energien godt omdannes til andre energiformer, men den samlede energi af de forskellige energiformer vil være konstant. Man siger energien er bevaret.

Energiomsætning og nyttevirkning

Benzin er stadig den mest benyttede energikilde i personbiler. Den kemiske energi, der er i benzinen, omsættes i motoren til mekanisk energi og varmeenergi. Den mekaniske energi er den, der giver bilen fremdrift via hjulene, hvorimod varmeenergien enten slet ikke anvendes, eller kun i meget begrænset omfang. Ifølge energiomsætningen gælder der, hvis bilen opfattes som et isoleret system:

$$E_{omsat} = E_{benzin} = E_{mekanisk} + E_{varme}$$

Hvor stor en brøkdelen af den kemiske energi i benzinen, der omsættes til bilens fremdrift, kan kaldes 'nytteenergien' E_{nytte} ved energiomsætningen E_{omsat} .

Generelt defineres *nyttvirkningen* η ved en energiomsætning ved

$$\eta = \frac{E_{nytte}}{E_{omsat}}$$

Ved enhver reel energiomsætning vil der altid være et 'tab'; dvs. at der ved omsætningen dannes en eller flere energiformer, som ikke udnyttes. Der gælder derfor $E_{nytte} < E_{omsat}$, og dermed vil nyttevirkningen η altid være mindre end 1 (100%)

Du kan eventuelt se [videoen her](#), for nogle flere eksempler på hvordan man beregner nyttevirkningen.

For en benzindrevet bil er nyttevirkningen ca. 20% afhængig af motortype og kørsel, dvs. kun ca. 20% af energien i benzinen omsættes til fremdrift via hjulene (betegnet TTW (Tank To Wheel) effektiviteten)¹.

For en elektrisk bil er nyttevirkningen højst 80%, men indregnes energitabet ved opladning, så er nyttevirkningen kun ca. 60%².

Energikvalitet

Omdannelse af energi fra en energiform til en anden, kan foregå med større eller mindre tab. Hvis en energiform let kan omdannes til en anden energiform uden væsentligt tab, siges energiformen at have stor *energikvalitet*.

Elektrisk energi kan let omdannes til mekanisk energi, fx i en elektrisk bil, og tilsvarende kan mekanisk energi let omdannes til elektrisk energi i fx et vandkraftværk. Så begge de nævnte energiformer har i den sammenhæng stor energikvalitet.

Elektrisk energi kan let, og med høj nyttevirkning, omdannes til termisk energi. Fx ved at opvarme noget vand i en elkedel. Den elektriske energi har i den sammenhæng høj energikvalitet. Men den varmeenergi der er i vandet, kan kun vanskeligt omdannes til andre energiformer, fx elektrisk eller mekanisk energi. Generelt gælder det, at termisk energi har lav energikvalitet. Ved enhver energiomdannelse vil den samlede energikvalitet falde.

¹ [Estimation of tank-to-wheel efficiency functions based on type approval data](#)

PetterArnesen, Torstein Aarseth Bø and Rebecka Snefugli Sondell

² [Efficiency Test Method for Electric Vehicle ..](#)

Kieldsen, Andreas; Thingvad, Andreas; Martinenas, Sergejus; Sørensen, Thomas Meyer

Energitæthed

Et begreb som har stor betydning, når man skal sammenligne forskellige energiformer, er *energitæthed*. Energitætheden er defineret som den mængde energi, der kan lagres enten pr. volumenenhed (volumetrisk tæthed) eller pr. masseenhed (specifik tæthed), og angives i enhederne $\frac{MJ}{L}$ eller $\frac{MJ}{kg}$. For energi lagret i batterier, angives energitæthed dog ofte i enhederne $\frac{kWh}{L}$ eller $\frac{kWh}{kg}$. I stedet for energitæthed bruges ofte betegnelsen *brændværdi* for fossile energikilder. Benzin har en energitæthed på ca. $43 \frac{MJ}{kg}$ og den mest anvendte batteritype i elbiler har en energitæthed på ca. $0,9 \frac{MJ}{kg}$; altså en faktor $\frac{43}{0,9} \cong 48$ mellem energitæthederne.

Centrale begreber for batterier

1. Effekttæthed.

Effekttæthed er hvor meget energi der kan omsættes pr. tidsenhed pr. masseenhed fra batteriet ($\frac{W}{kg}$).

2. Opladningshastighed

Vigtig parameter i elbiler eller i elektrisk værktøj, da så kort opladningstid som muligt tilstræbes.

3. Sikkerhed

Genopladelige batterier kan spontant bryde i brand eller eksplodere. Især lithium-ion batterier er følsomme overfor op- og afladning. For at undgå dette benyttes i langt de fleste tilfælde et "Battery Management System" (BMS). Beskyttelsessystemet sørger for, at effekttætheden ikke bliver for stor samt at batteriet hverken aflades for meget eller oplades ved for høj spænding. BMS kan i nogle tilfælde også beskytte mod for høje temperaturer i batteriet.

4. Driftsområde

Det er vigtigt, at batterierne kan operere i et stort temperaturinterval. Hvis batterierne skal benyttes i en elbil, skal de selvsagt virke så optimalt som muligt i både frostvejr og på en varm sommerdag.

	Li-Co	Li-Mn	Li-P	Li- (Ni/Co/Mn)
Hvilespænding U_0 (V)	3,60	3,70	3,30	3,60-3,70
Antal genopladninger	500	500-1000	1000-2000	1000-2000
Energitæthed ($\frac{kWh}{kg}$)	0,150- 0,190	0,100 – 0,140	0,090 – 0,120	0,140
Højeste temperatur før der indtræder elektrokemiske ændringer (°C)	150	250	270	210
Selvafladning	Lille	Lille	Stor	Lille
Anvendelse	Mobiltelefoner og bærbare pc	Elektriske biler, værktøjer og i medicinsk udstyr.	Stadig på forsøgsstadiet.	Elektriske biler, værktøjer og i medicinsk udstyr.

Elementer og spændingskilder

Et element har to poler, en positiv og en negativ. Fortegnet henviser til en ladningsforskel q mellem de to poler. Symbolet for et element ses herunder

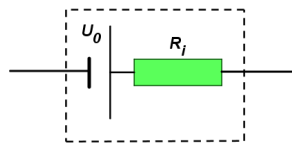


Den lange lodrette streg symboliserer den positive pol, den korte den negative pol.

Et element er en energikilde. Spændingsforskellen mellem polerne, når elementet er ubelastet (ikke indgår i et elektrisk kredsløb), er et udtryk for hvor stor energi E spændingskilden potentielt kan omsætte pr. ladningsenhed (det arbejde elementet kan udføre pr. ladningsenhed). Man kalder den for *hvilespændingen* og den betegnes U_0 . Der gælder:

$$U_0 = \frac{E}{q} \text{ eller } E = q \cdot U_0$$

Når et element indsættes i et elektrisk kredsløb, og der går en strøm I i kredsløbet, vil denne strøm ikke kun gå i det ydre kredsløb, men også passere gennem elementet. Når strømmen passerer gennem elementet, vil der afsættes energi. Den energi, der afsættes pr. ladningsenhed i elementet, kan symboliseres ved, at der er et spændingsfald U_i over en indre modstanden R_i i elementet; dvs. $U_i = R_i \cdot I$. Symbolet for et element ses derfor ofte også illustreret som



hvor  symboliserer spændingskildens indre modstand og det stiplede rektangel elementet.

Spændingen over polerne, når elementet er belastet, vil derfor være mindre end hvilespændingen. Spændingen under belastning, kaldes for *polspændingen* og betegnes U_p

$$U_p = U_0 - U_i$$

Hvis et batteri med hvilespændingen U_0 og indre modstand R_i sættes i et kredsløb, hvor den samlede ydre modstand er R_y , vil polspændingen være givet ved

$$U_p = I \cdot R_y$$

hvor I er strømstyrken i kredsløbet. Da $U_i = I \cdot R_i$ fås:

$$U_0 = I \cdot R_y + I \cdot R_i$$

Seriekobling af batterier

Hvis n ens batterier, hver med hvilespændingen U_0 og indre modstands R_i , kobles i serie, vil den samlede hvilespænding være givet ved:

$$U_{0-serie} = n \cdot U_0$$

og den samlede polspænding, hvis batteriet sættes i et kredsløb, hvori der går strømmen I , være givet ved:

$$U_{p-serie} = n \cdot (U_0 - R_i \cdot I)$$

Effekterne der afsættes i såvel det ydre kredsløb P_y som i batteriet P_i , er givet ved:

$$P_y = R_y \cdot I^2 \quad \text{og} \quad P_i = n \cdot R_i \cdot I^2$$

Nyttevirksomheden for n ens serieforbundne elementer er givet ved:

$$\eta = \frac{P_y}{P_y + P_i} = \frac{R_y \cdot I^2}{n \cdot R_i \cdot I^2 + R_y \cdot I^2} = \frac{R_y}{n \cdot R_i + R_y}$$

Ved et meget stort antal serieforbundne batterier (n meget stor) og en konstant ydre modstand R_y , vil nyttevirksomheden nærme sig 0 (0%). Hvis n er meget stor, er nyttevirksomheden:

$$\eta \approx \frac{R_y}{\infty + R_y} \approx 0$$

Parallelkobling af batterier

Hvis n ens batterier, hver med hvilespændingen U_0 og indre modstands R_i , kobles parallelt, vil den samlede hvilespænding være givet ved:

$$U_{0-parallel} = U_0$$

og den samlede polspænding ved:

$$U_{pol-parallel} = U_0 - \frac{R_i}{n} \cdot I$$

I lighed med tilfældet med seriekoblede elementer, fås nyttevirksomheden for n ens parallelforbundne elementer til

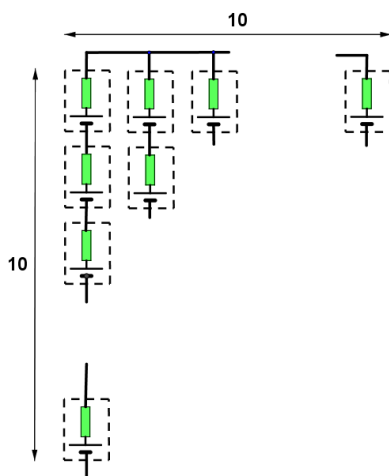
$$\eta = \frac{P_y}{P_y + P_i} = \frac{R_y \cdot I^2}{\frac{R_i}{n} \cdot I^2 + R_y \cdot I^2} = \frac{R_y}{\frac{1}{n} \cdot R_i + R_y}$$

Ved et meget stort antal parallelforbundne ens elementer (n meget stor) og en konstant ydre modstand R_y , vil nyttevirksomheden nærme sig 1 (100%).

$$n \text{ stor: } \eta \approx \frac{R_y}{0 + R_y} = 1$$

Batteripakker

Vi ser nu på en batteripakke, der består af 10 gange 10 serieforbundne batterier, der er forbundet parallelt (se figuren nedenfor). Alle elementerne antages at være ens med hvilespænding U_0 og indre modstand R_i . Batteripakken er koblet til en ydre modstand R_y .



For hver af de 10 serieforbundne batterier gælder at den samlede polspænding er

$$U_p = 10 \cdot (U_0 - R_i \cdot I) = 10 \cdot U_0 - 10 \cdot R_i \cdot I$$

Når disse 10 serieforbundne elementer kobles parallelt med 9 tilsvarende seriekoblinger, vil polspændingen over denne 'batteripakke' være givet ved

$$U_p = 10 \cdot U_0 - \frac{1}{10} \cdot 10 \cdot R_i \cdot I = 10 \cdot U_0 - R_i \cdot I$$

Ved denne parallelkobling opnår man, at den samlede indre modstand og dermed tabet af energi bliver mindre.

Eksempel:

Vi ser på en batteripakke som ovenstående, hvor elementerne har hvilespændingen $3,7 \text{ V}$ og en indre modstand på $0,25 \Omega$.

$$U_p = 10 \cdot 3,7 \text{ V} - 0,25 \Omega \cdot I = 37 \text{ V} - 0,25 \Omega \cdot I$$

De 10 seriekoblede elementer, hvis hvilespænding er 37 V , indsættes i et kredsløb, hvor den samlede ydre modstand er $5,0 \Omega$

Nyttevirksomheden bliver

$$\eta = \frac{5,0 \Omega}{2,5 \Omega + 5,0 \Omega} \cong 0,67$$

Hvis batteripakken, som også har hvilespændingen 37 V , indsættes i samme kredsløb bliver nyttevirksomheden

$$\eta = \frac{5,0 \Omega}{0,25 \Omega + 5,0 \Omega} \cong 0,95$$

Desuden indeholder batteripakken 10 gange så meget energi som den enkelte seriekobling (og 100 gange så meget som det enkelte element). En batteripakke til fx en Tesla model S, 85 kWh , har 7104 elementer, med en hvilespænding på $3,6 \text{ V}$.

Batteridrevne biler

I et batteri omdannes kemisk energi til elektrisk energi. De elektrokemiske processer i batterier er i nogle tilfælde irreversible (kan ikke genoplades) og i andre tilfælde reversible (kan genoplades). I de batterier der benyttes i elbiler, er de kemiske processer reversible. Der er dog en grænse for, hvor mange gange denne type batterier kan genoplades.

Der eksisterer mange forskellige typer af genopladelige batterier. Hvad der karakteriserer et 'godt' genopladeligt batteri, afhænger af i hvilken sammenhæng batteriet bruges. For elbiler er den mest udbredte type lithium-ion-batterier.

Fordele:

- Stor energitæthed og effekttæthed (kan levere stor energi på kort tid) sammenlignet med andre typer genopladelige batterier
- Høj nyttevirkning
- Høj spænding pr. celle (op til 3.7 V - 3.8 V)
- Kan op- og aflades hurtigere end de fleste andre typer genopladelige batterier

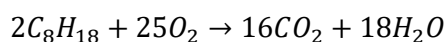
Ulemper:

- Begrænsede ressourcer af lithium og derfor er prisen på batterierne uforudsigelig. Lithium kan dog genanvendes, men denne proces er ikke nødvendigvis klimaneutral.
- Fabrikation af batterierne er overvejende ikke CO_2 -neutral
- Selvom antal genopladninger øges er der et problem med at batteripakken skal udskiftes efter et vist antal år

Benzindrevne biler

I en benzinmotor omdannes kemisk energi i benzin ved forbrænding, til termisk energi i motorens cylindre. Den termiske energi omdannes via stemplerne til mekanisk energi.

Benzin er en blanding af mange organiske forbindelser. Så der findes ikke én formel for benzin, det er et blandingsprodukt. Alle benzintyper indeholder dog C_8H_{18} (oktan). Den afstemte reaktion af forbrændingen af oktan med dioxygen fra luften er:



Ved forbrændingen stiger temperaturen i cylinderen. Fra reaktionskemaet ses, at forholdet mellem stofmængderne $n_{før}$ og n_{efter} er $34/27 \cong 1,3$. Vi isolerer nu trykket (p) i idealgasligningen.

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

Antager vi at volumenet (V) er konstant, kan vi se at flere molekyler (n) og højere temperatur (T) øger trykket i stemplet ved reaktionen.

Fordele:

- Benzin har stor energitæthed sammenlignet med energi lagret i batterier
- Let tilgængeligt gennem veletableret forsyningsnet
- Relativt billigt, da der stadig er store ressourcer og stor konkurrence

Ulemper:

- Klimabelastningen fra CO_2 er stor
- På sigt opbruges mængden af fossilt brændstof. Selvom benzinen erstattes af bioethanol eller andet CO_2 neutralt brændstof, vil en sådan omstilling potentielt lægge beslag på ressourcer, som kunne benyttes til fx fødevarer.
- Lille nyttevirkning

Relevante links til opgave 6 i elevhæftet

Elbiler og ladetid:

<https://pro.ing.dk/mobilitytech/artikel/flere-elbiler-har-problemer-med-lang-ladetid-i-danmark-3688>

Elbilers rækkevidde

<https://fdm.dk/alt-om-biler/elbil-hybridbil/opladning/saa-langt-koerer-elbilen-paa-en-opladning>

Elbilers klimabelastning

<https://www.carbonbrief.org/factcheck-how-electric-vehicles-help-to-tackle-climate-change>

Elbilers klimabelastning sammenlignet med benzinbiler

<https://videnskab.dk/teknologi-innovation/nyt-studie-konkluderer-selv-naar-produktionen-regnes-med-udleder-elbiler-mindre>

Elbiler og infrastruktur

<https://videnskab.dk/teknologi-innovation/hvad-skal-der-til-for-at-naa-en-million-elbiler-i-2030>

Nye batterityper

<https://videnskab.dk/sporg-videnskaben/bliver-batterier-ikke-snart-bedre>

Elbiler og batterier om genanvendelse

<https://phys.org/news/2019-12-lithium-recycled.html>