



STIRLINGMOTORN

En analys av β -typ Stirlingmotorns funktion och Stirlingmotorns tillämpningar

Kandidatseminarium 5.10.2024

Kai Stolker



INNEHÅLL

- Bakgrund
- Funktionsprincip
- Stirlingcykeln:
 - Stirlingcykelns steg
 - Stirlingcykelns arbete (och svänghjulets arbete)
- Verkningsgrad:
 - Mekanisk verkningsgrad (exempel)
 - Termisk verkningsgrad
 - Teoretisk vs. verklig verkningsgrad
- Stirlingmotorns allmänna fördelar
- Stirlingmotorns allmänna nackdelar
- Tillämpningar:
 - Fordon
 - Energiproduktion
 - Datorfläkt
 - NMRI Maskin
- Sammanfattning



BAKGRUND

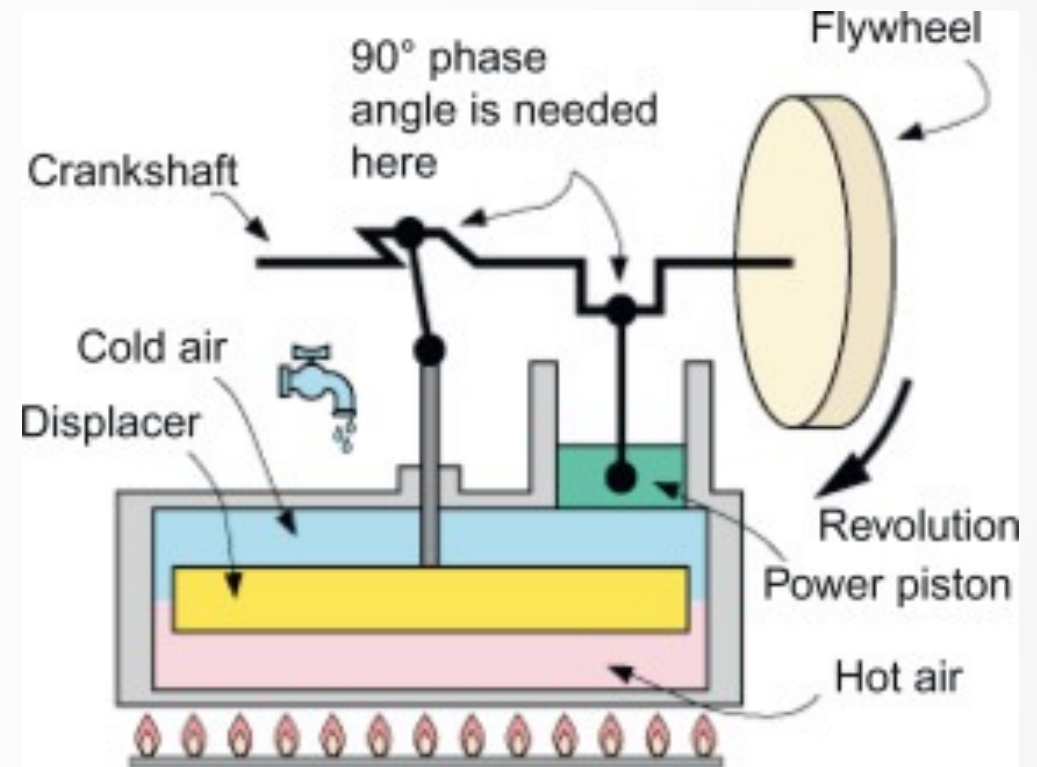
- Uppfanns 1816 av skotsken Robert Stirling (1790-1878).
- Delas konventionellt i tre typer: alpha, beta, och gamma.
- Klassificeras som en extern värmemaskin.





FUNKTIONSPRINCIP

- Konverterar värme till mekaniskt arbete.
- Behållaren i motorn bildar ett slutet system (tillåter utbyte av energi med omgivningen, men inte utbyte av partiklar).
- Arbetsgasen i behållaren värms och kyls cykliskt av externa värmekällor.

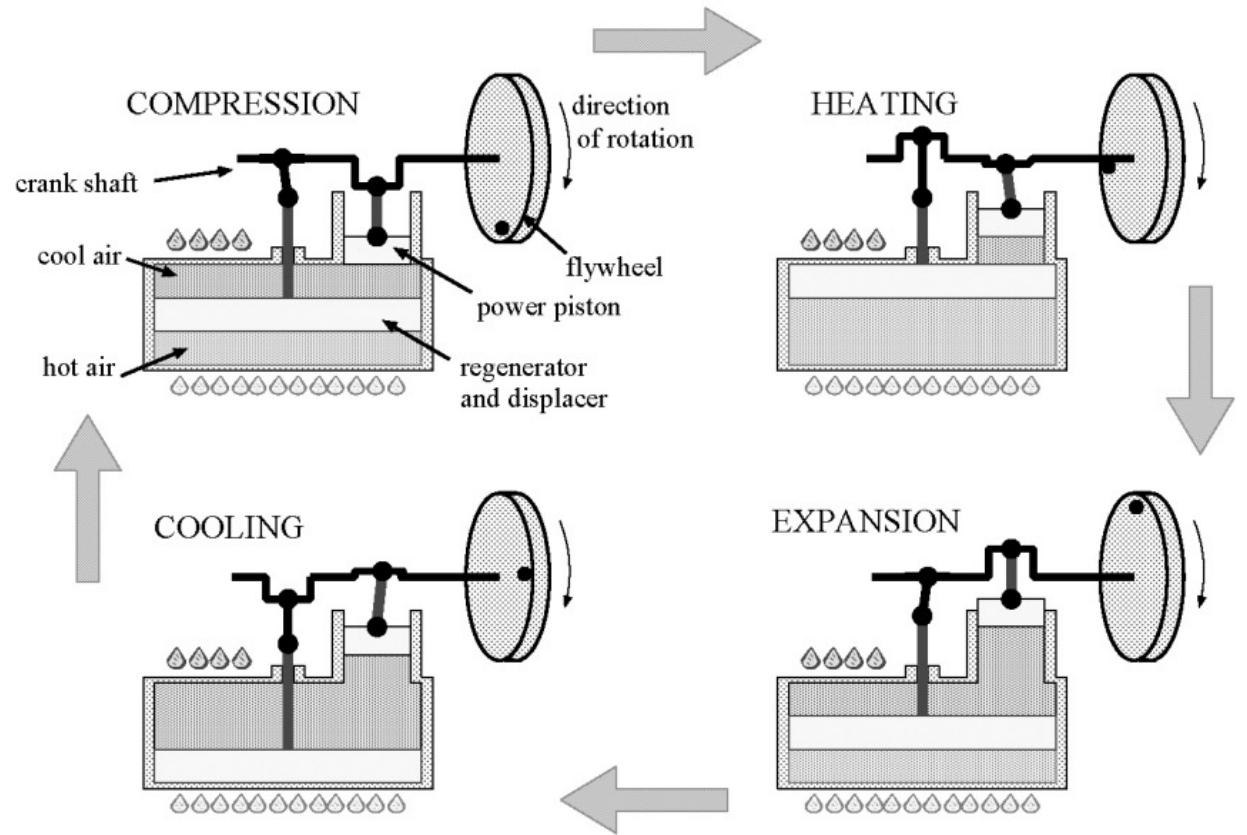


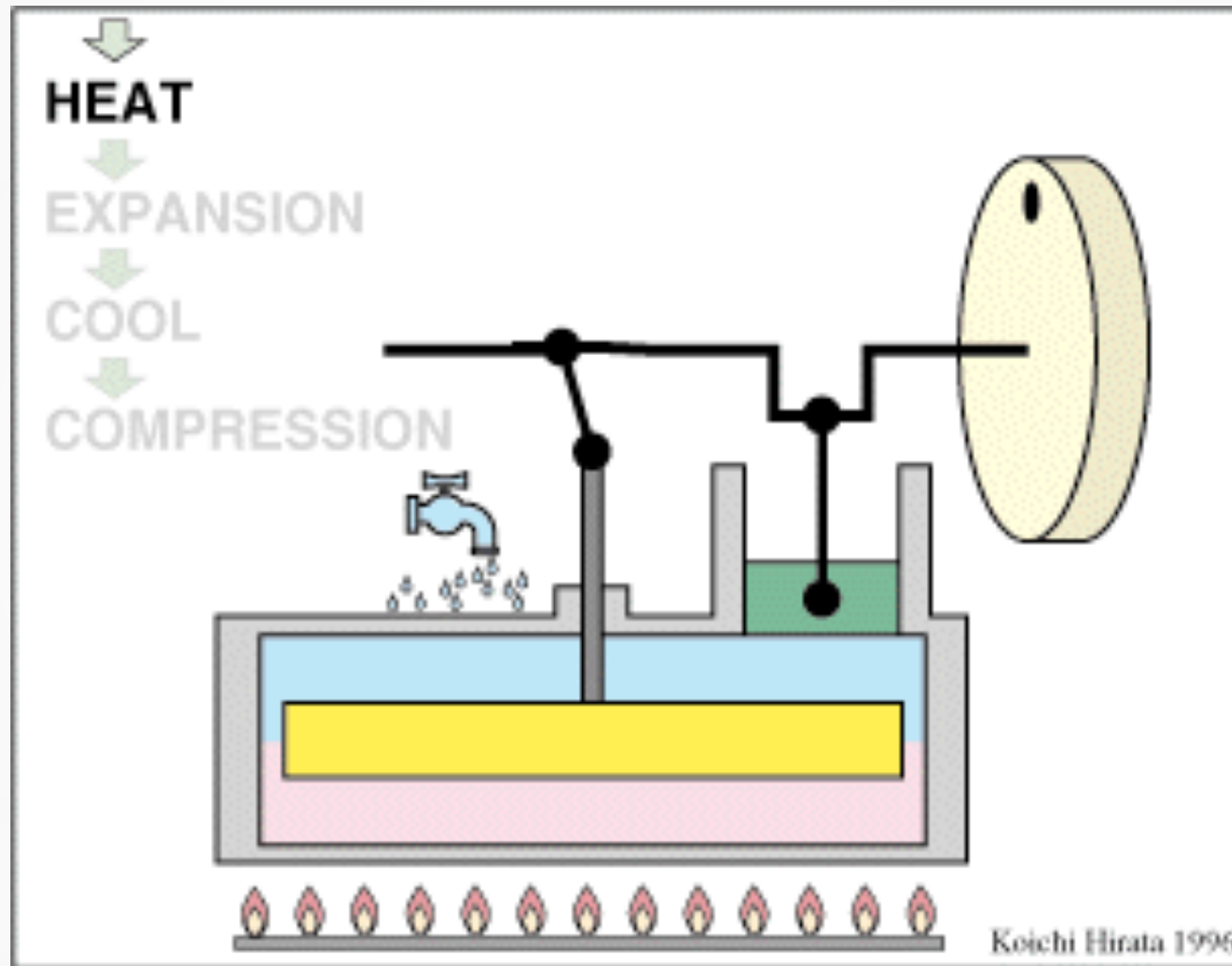


FUNKTIONSPRINCIP

Gay-Lussac:

- När en gas värms upp isokoriskt ökar dess tryck.
- När en gas kyls ned isokoriskt minskar dess tryck.



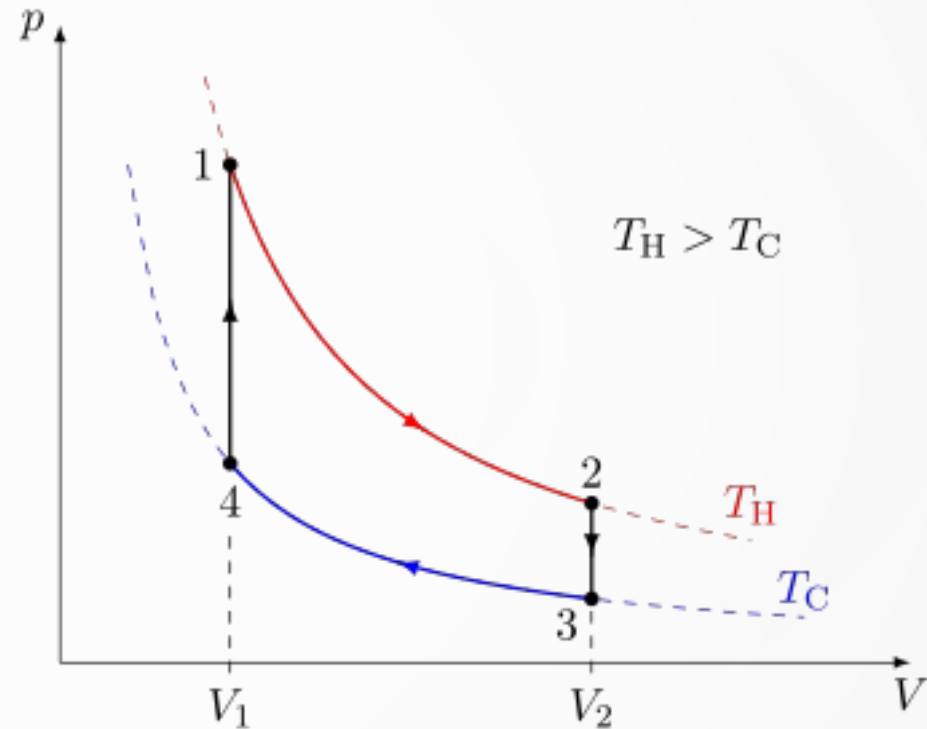




STIRLINGCYKELN

Steg

- 1 → 2: Isoterm expansion
 - 2 → 3: Isokorisk nedkylning
 - 3 → 4: Isoterm kompression
 - 4 → 1: Isokorisk uppvärmning
-
- Stirlingcykeln är reversibel → motorn kan fungera både som värmepump och för nedkylning.





STIRLINGCYKELNS ARBETE

Arbetet av en expanderande gas:

$$dW = pdV \quad (1)$$

Arbetet för processen är arean under kurvan.
För en cykel gäller då:

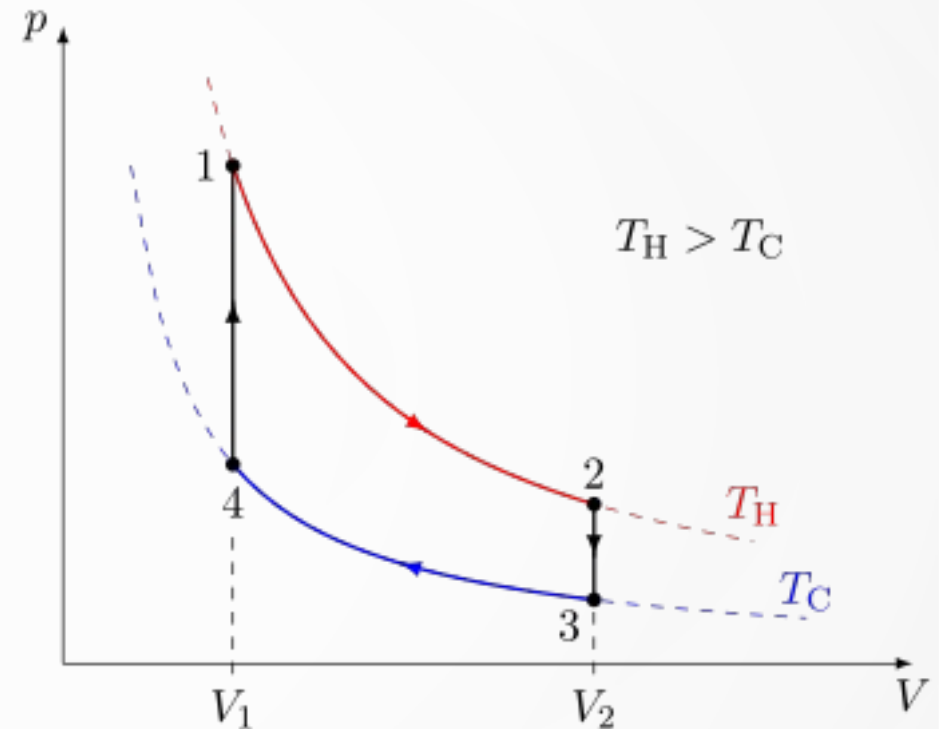
$$W_{gas} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 3} + W_{3 \rightarrow 4} + W_{4 \rightarrow 1} \quad (2)$$

Processerna $2 \rightarrow 3$ och $4 \rightarrow 1$ isokoriska:

$$dV = 0 \Rightarrow W_{2 \rightarrow 3} = W_{4 \rightarrow 1} = 0 \quad (3)$$

Således gäller:

$$W_{gas} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{3 \rightarrow 4} \quad (4)$$





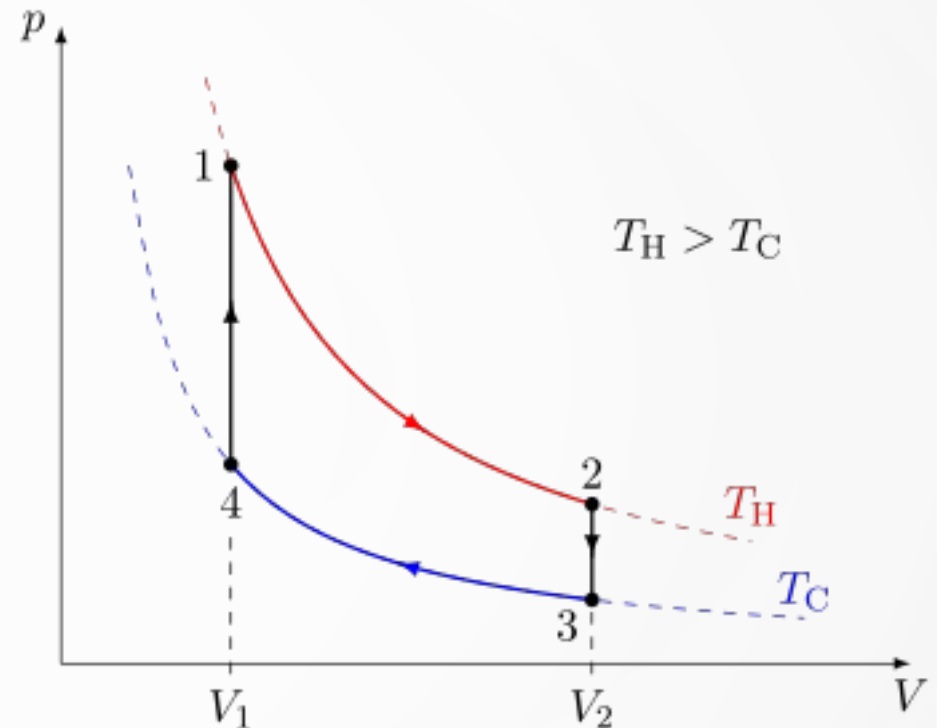
STIRLINGCYKELNS ARBETE

Låt $p_{1 \rightarrow 2}$ beteckna trycket vid punkt 1 och $p_{3 \rightarrow 4}$ trycket vid punkt 3:

$$W_{gas} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{3 \rightarrow 4} = \int_{V_1}^{V_2} p_{1 \rightarrow 2} dV + \int_{V_2}^{V_1} p_{3 \rightarrow 4} dV \quad (5)$$

Gasbehållaren utgör ett slutet system $\Rightarrow$ partikelantalet n är konstant. Vi använder idealgaslagen $p = \frac{nRT}{V}$.

$$W_{gas} = nRT_H \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV + nRT_C \int_{V_2}^{V_1} \frac{1}{V} dV \quad (6)$$





STIRLINGCYKELNS ARBETE

$$(5) \quad W_{gas} = nRT_H \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV + nRT_C \int_{V_2}^{V_1} \frac{1}{V} dV$$

$$(6) \quad = nRT_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + nRT_C \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$(7) \quad nRT_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - nRT_C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$(8) \quad W_{gas} = nR(T_H - T_C) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Beräkningssteg

Uttrycket från föregående slide

Integralregel $\int \frac{1}{x} dx = \ln(x)$ och
logaritmregel $\ln(x_2) - \ln(x_1) = \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right)$

Logaritmregel $\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) = -\ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right)$

Faktorisering av termerna



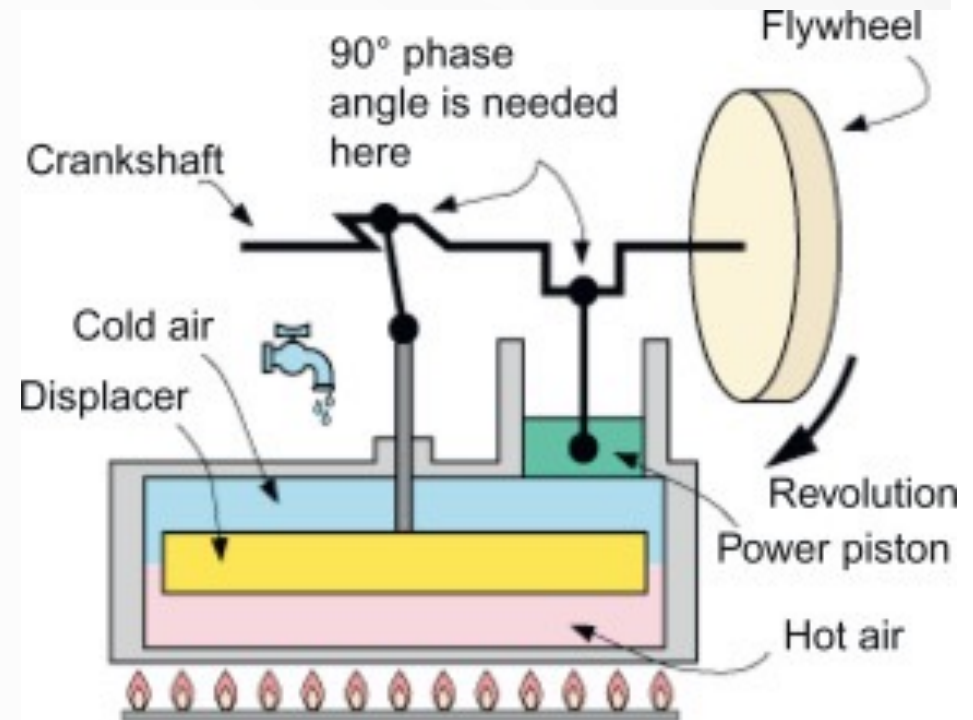
SVÄNGHJULETS ARBETE

Mekaniska arbetet av svänghjulet ges av dess rotationskinetiska energi:

$$W_{svänghjul} = K_{svänghjul} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (9)$$

Vi antar att svänghjulet är en cirkulär skiva:

$$W_{svänghjul} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} M r^2 \right) (2\pi f)^2 = M r^2 \pi^2 f^2 \quad (10)$$

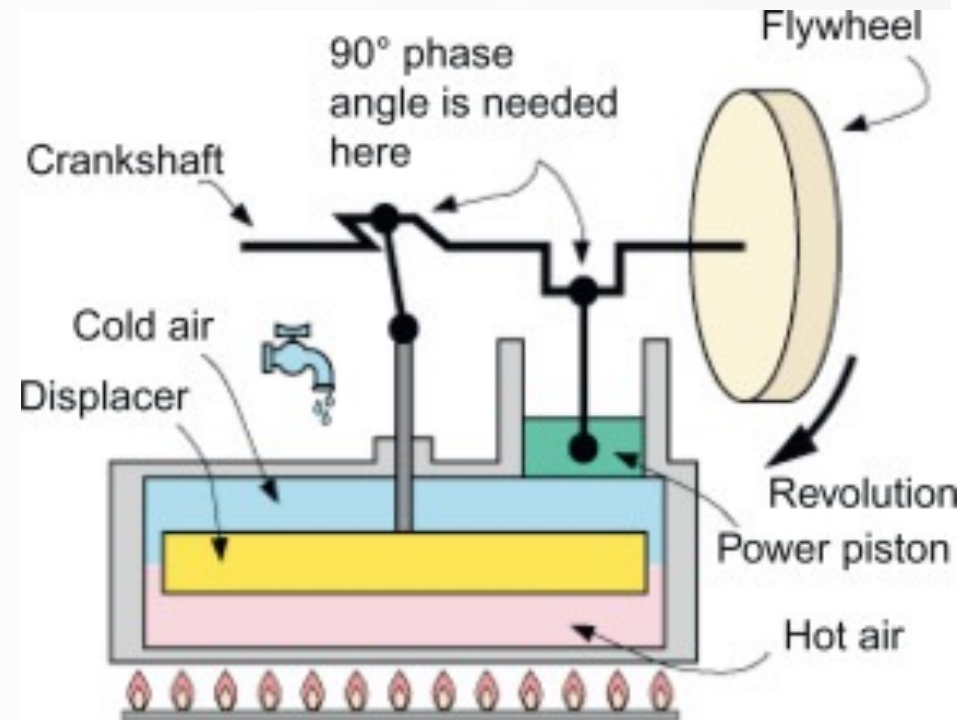




MEKANISK VERKNINGSGRAD

Den mekaniska verkningsgraden blir:

$$\eta_{\text{mekanisk}} = \frac{W_{\text{svänghjul}}}{W_{\text{gas}}} = \frac{Mr^2\pi^2 f^2}{nR(T_H - T_C)\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} \quad (11)$$





TERMISK VERKNINGSGRAD

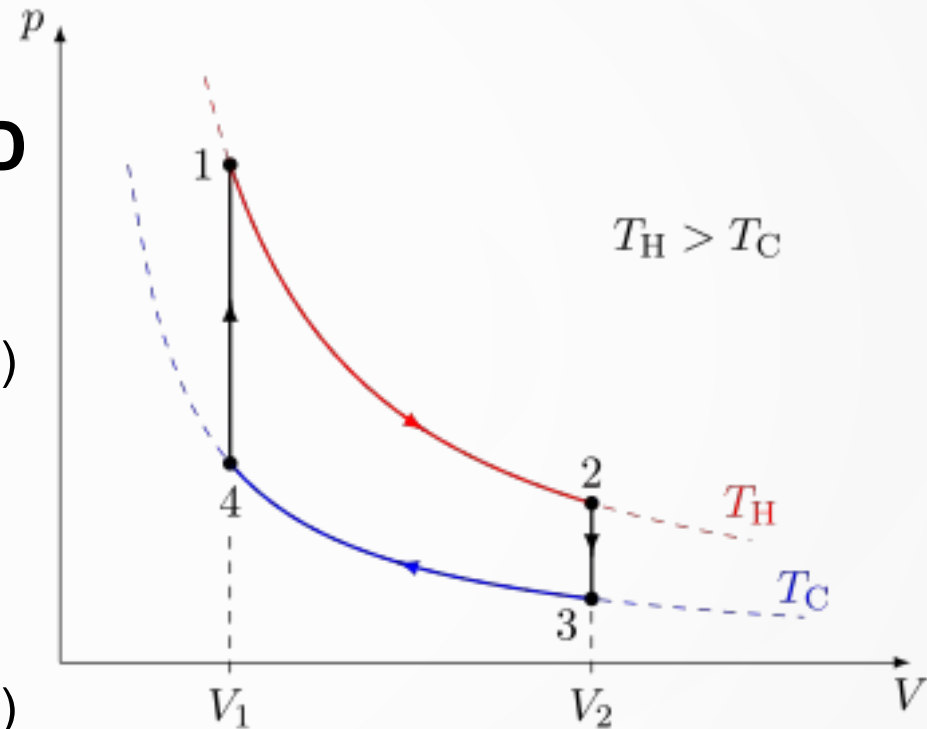
Värmen som sätts in stammar från T_H värmereservoaren:

$$Q_{in} = nRT_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (12)$$

Den termiska verkningsgraden ges av:

$$\eta_{termisk} = \frac{W_{ut}}{Q_{in}} = \frac{nR(T_H - T_C) \ln(V_2/V_1)}{nRT_H \ln(V_2/V_1)} \quad (13)$$

$$= 1 - \frac{T_C}{T_H}$$





TEORETISK VS VERKLIG VERKNINGSGRAD

- Stirlingcykelns teoretiska termiska verkningsgrad motsvarar Carnot verkningsgraden!
- Verkliga termiska verkningsgraden ligger kring 58% av Carnot verkningsgraden. (P.H. Riley – Nottingham University).



STIRLINGMOTORNS ALLMÄNNA FÖRDELAR

- Opererar enbart genom en temperaturskillnad $\Rightarrow$ bredare bränsleutbud.
- Kan få energi från ex. Solljus eller spillvärme $\Rightarrow$ ren energiproduktion.
- Saknar ventiler och intern förbränning $\Rightarrow$ tystare och orsakar mindre vibration än andra jämförbara förbränningsmotorer (ex Ottomotorn).
- Får mindre slitage, kräver mindre smörjning och allmänt mindre uppehåll.
- Fungerar relativt bra vid lägre temperaturer (ingen förtjockning av inre bränsle).





STIRLINGMOTORNS ALLMÄNNA NACKDELAR

- Tar mera plats jämfört med interna förbränningsmotorer och har större massa per effektenheter.
- Långsammare start än vid en intern explosion (inre förbränningsmotorer) $\Rightarrow$ olämplig för plötsliga accelerationer.
- Effektivitet och verkningsgrad starkt beroende på dess design:
 - Designen innebär komplicerade geometriska och fysikaliska parametrar.
 - Svårt att tillverka effektiva motorer.





STIRLINGMOTORNS TILLÄMPNINGAR: FORDON

- Historiskt har Stirlingmotorn varit oframgångsrik i fordon.
- Nuförtiden arbetas på att använda Stirlingmotorer i hybridfordon:
 - Plötsliga rörelser sköts av elmotorer, medan “cruising” kan utföras av Stirlingmotorn.

1979 DOE NASA AMC Spirit DL





STIRLINGMOTORNS TILLÄMPNINGAR: ENERGIPRODUKTION

- Används främst inom solenergi.
- Låg drivskost & relativt kompakt
 - Storleken kan ändras enligt energibehov.
- Materiella begränsningar: materialet bestämmer delvis effektivitet och verkningsgrad.
- Samma begränsning som solpaneler: vad om solen inte skiner?



STIRLINGMOTORNS TILLÄMPNINGAR: ENERGIPRODUKTION

Bilden:

- Stirlingmotorn placeras i mitten av en konkav spegel $\Rightarrow$ solljus reflekteras mot motorns ena sida, vilket utgör dess värmebad.
- Verkningsgrad på 40% och effekt på 7-25 kW.
- Billigaste energiproduktionsanordningarna under 100 kW.





STIRLINGMOTORNS TILLÄMPNINGAR: DATORFLÄKT

- Miniaturfläkt som opererar på värmen från processorkomponenter (MSI).
- Kyler ned kringliggande komponenter.





STIRLINGMOTORNS TILLÄMPNINGAR: NMRI

- Kryokylare utnyttjar reversibiliteten av Stirlingcykeln (uppnår temperaturer under 100 K (t.o.m. 10 K för forskningsändamål).
 - NMRI system: innehåller en supraledande spole vars temperatur bör hållas vid ca. 10 K.





SAMMANFATTNING: VAD KAN VI SÄGA OM STIRLINGMOTORN?

- En gammal värmemäskin från 1800-talet som gör återkomst inom energiproduktion.
- Dess externa funktionsprincip leder till flexibilitet av värmekälla, som ger den stor potential som en av framtidens värmemaskiner.
- Likt andra motorer är den situationsspecifik, men dess fördelar är relevanterare nu än någonsin tidigare!





BIBLIOGRAFI

- Blundell, Stephen J., Blundell, Katherine M. (2009). 'Concepts in Thermal Physics 2nd Edition'. Oxford University Press. [Bok].
- Chabay, Ruth W. and Sherwood, Bruce A. (2015). 'Matter and Interactions, 4th Edition'. Wiley. [Bok].
- Hirata, Koichi (1995). 'Structure of Stirling Engines'. [Bild]. Hämtad från:
<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/struct.htm>
- Hirata, Koichi (1995). 'Principle of Displacer Type Stirling Engines'. [Animation]. Hämtad från:
http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/anime_c.htm
- Yeadon, Will and Quinn, Mark (2021). 'Thermodynamics Education for Energy Transformation: a Stirling Engine Experiment'. [Online artikel]. Hämtad från: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/ac142c/pdf>
- Quinzacara, Cristian (2021). 'Stirling Cycle, pV'. [Bild]. Hämtad från:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stirling_cycle_pV.svg



BIBLIOGRAFI

Gustafsson, Tore K. (2017). 'Ingenjörsmatematisk formelsamling'. Kemistklubben vid Åbo Akademi.

[Formelsamling]. Hämtad från:

[https://users.abo.fi/tfredman/Ingenj%C3%B6rsmatematisk Formelsamling_13uppl_2017.pdf](https://users.abo.fi/tfredman/Ingenj%C3%B6rsmatematisk_Formelsamling_13uppl_2017.pdf)

Riley, Paul H. (2015). 'The Myth of the High-Efficiency External-Combustion Stirling Engine'. [Online artikel].

Hämtad från: https://file.scirp.org/pdf/ENG_2015121717392471.pdf

Ruijie LI (2017). 'Applications of Stirling Engine in Sustainable Development Context-Experimental and

Numerical Study'. [Doktorsavhandling]. Université Paris Nanterre. Hämtad från:

<https://bdr.parisnanterre.fr/theses/internet/2017/2017PA100066/2017PA100066.pdf>

Planas, Oriol (2018). 'Advantages and Disadvantages of the Stirling Engine'. [Online artikel]. Hämtad från:

<https://en.demotor.net/stirling-engine/advantages-disadvantages>

Alfarawi, Suliman (2017). 'Modelling and Optimization of High Temperature Difference (HTD) Gamma-Type Stirling Engine Prototype'. [Doktorsavhandling]. University of Birmingham. Hämtad från:

<https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/7933/1/Alfarawi17PhD.pdf>



BIBLIOGRAFI

Appel, Björn (2015). 'DISH-STIRLING Research Project in Font-Romeu-Odeillo, France.'. [Bild]. Hämtad från:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dish-stirling-at-odeillo.jpg>

Micro-Star International (2008). 'World's First Powerless Air Cooler on a Motherboard!' [Bild]. Hämtad från:
<https://www.msi.com/news/detail/WorldsFirstPowerlessAirCooleronMotherboardMSIpresentsthequotAirPowerCoolerquot591>