

Eero Heikkilä

# Stirlingmoottorin hyödyntäminen ajoneuvokäytössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

26.5.2015

Tekijä(t) Otsikko	Eero Heikkilä Stirlingmoottorin hyödyntäminen ajoneuvokäytössä
Sivumäärä Aika	48 sivua 26.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Heikki Parviainen Tuotekehitys dipl.ins. Seppo Mikkonen, Neste Oyj
<p>Tämän insinööri työn tavoitteena oli selvittää stirlingmoottorin mahdollista soveltuvuutta ajoneuvokäyttöön modernin sähköisen voimalinjan kanssa. Työn tilasi Neste Oyj:n tuotekehitysosasto. Työssä tarkastellaan stirlingmoottoria jatkuvasti ajoneuvokäytön näkökulmasta.</p> <p>Työ on kirjallisuustutkimus, jossa aluksi selvitetään kattavasti stirlingmoottorin historia, toimintaperiaate, erilaiset rakennemahdollisuudet, komponentit ja niiden merkitys moottorin toiminnan kannalta. Stirlingmoottorin yleisiä ominaisuuksia esitellään verraten näitä otto- ja dieselmoottorin ominaisuuksiin. Työ esittelee lyhyesti erilaiset hybridautojen rakennevaihtoehdot ja toteaa stirlingmoottorin soveltuvan parhaiten sarjahybridi-ajoneuvon voimanlähteeksi. Lisäksi työssä tarkastellaan stirlingmoottorivaihtoehtoja, joista esitellään kehittynein ajoneuvostirlingmoottori vuodelta 1986 sekä moderneja stirlingmoottoreita.</p> <p>Työn tavoitteeseen vastataan, kun verrataan esiteltyjä moderneja stirlingmoottoreita otto- ja dieselmoottoreihin ja vertailua peilataan olemassa olevaan sarjahybridiin, Opel Ampearaan. Vertailu suoritetaan laskentaan tukeutuen energiankäytön, päästöjen, paino- tehosuhteen, suorituskyvyn ja muiden pienempien yksityiskohtien osalta. Vertailu osoittaa stirlingmoottorin olevan kilpailukykyinen vaihtoehto sarjahybridiajoneuvon voimanlähteeksi, mutta ajoneuvokäyttöön soveltuvaa moottoria ei ole markkinoilla tarjolla. Stirlinghybridiprototyypin rakentaminen vaatisi ensiksi moottorinkehitysprojektin potentiaalisen moottorinvalmistajan kanssa.</p>	
Avainsanat	Stirlingmoottori, hybridi, sarjahybridi

Author(s) Title	Eero Heikkilä Stirling Engine in Vehicular Use
Number of Pages Date	48 pages 26 September 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Heikki Parviainen, Senior Lecturer Seppo Mikkonen, MSc, Neste Oyj, R&D
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to study the possibility of using a stirling engine in a hybrid passenger car together with an electric powertrain. The thesis was commissioned by the Research and Development unit of Neste Oyj. The stirling engine was explored continuously from the point of view of vehicular usage in this thesis.</p> <p>This thesis focuses on literature research. First the history of the stirling engine is introduced. After that the operational principle, different construction possibilities, components and their operational significance in the stirling engine are explained. Common features of the stirling engine are presented and compared with the otto engine and the diesel engine. The thesis presents briefly different constructional alternatives of the hybrid vehicles, and states that the stirling engine works best in series hybrid configuration. The thesis presents also different stirling engine alternatives, the most developed automotive stirling engine from year 1986 and modern stirling engines.</p> <p>The modern stirling engines are compared to otto engines and diesel engines, and the results are compared to the existing series hybrid passenger car, Opel Ampera. This comparison is carried out by calculating energy consumption, emissions, power to weight ratio, efficiency and other smaller aspects. This comparison shows that the stirling engine is a competitive alternative as a power source in a series hybrid vehicle but a suitable engine for vehicular use is not available in the market. Building of the stirling hybrid vehicle prototype would require an engine development project as a first step.</p>	
Keywords	Stirling engine, Hybrid vehicle, Series Hybrid

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Stirlingmoottori	2
2.1	Stirlingmoottorin historia	2
2.2	Stirlingmoottorin toiminta ja termodynamiikka	4
2.2.1	Yleistä	4
2.2.2	Ideaalinen stirlingtyökierto	5
2.2.3	Todellinen kierto	7
2.3	Moottorityypit	9
2.3.1	Alfa-tyyppi	10
2.3.2	Beta-tyyppi	11
2.3.3	Gamma-tyyppi	12
2.3.4	Vapaamäntäinen stirlingmoottori ja muut sovellukset	12
2.4	Kampikoneistotyypit	13
2.5	Lämmönvaihtimet	17
2.6	Stirlingmoottorien yleisiä ominaisuuksia	21
3	Modernien hybridautojen voimansiirtototeutukset	27
3.1	Hybridautojen luokittelu	27
3.2	Stirlingmoottorin yhdistäminen sähköiseen voimalinjaan	30
4	Stirlingmoottorivaihtoehtoja	31
4.1	Mod II -henkilöautomoottori	31
4.2	Modernit moottorit	34
5	Stirlingmoottori hybridikäytössä	37
5.1	Vertailuajoneuvo Opel Ampera	37
5.2	Energiankäyttö	38
5.3	Päästöt	40
5.4	Paino-tehosuhde	41
5.5	Suorituskyky	43
5.6	Muita vertailukohtia	45

6 Yhteenveto

47

Lähteet

49

## Lyhenteet

CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi.
kW	Kilowatti.
GM	General Motors.
DOE	Department of Energy, Yhdysvaltain energiaosasto.
r/min	Kierrosta minuutissa.
MTI	Mechanical Technology Incorporated.
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
$Q_C$	Puristustilasta ympäristöön poistuva lämpömäärä.
$Q_E$	Laajentumistilaan ympäristöstä absorboituva lämpömäärä.
$T_{min}$	Puristustilassa vallitseva matala lämpötila.
$T_{max}$	Laajentumistilassa vallitseva korkea lämpötila.
$p$	Paineen tunnus.
$V$	Tilavuuden tunnus.
$T$	Lämpötilan tunnus.
$S$	Entropian tunnus.
CHP	Combined Heat and Power.
HC	Palamattomat hiilivedyt, lukeutuvat haitallisiin päästöihin.
CO	Hiilimonoksidi, lukeutuu haitallisiin päästöihin.
NO <sub>x</sub>	Hiilivedyt, lukeutuvat haitallisiin päästöihin.
CSP	Concentrated Solar Power.
Nm	Newtonmetri.
SAE	Society of Automotive Engineers.
$P_{mot}$	Polttomootorin akseliteho.
$P_e$	Generaattorin tuottama sähköteho.
$P_W$	Pyörällä vaadittava teho.
$P_{stir}$	Stirlingmoottorilta vaadittava akseliteho.
$P_{em}$	Sähkömoottorilta vaadittava akseliteho.
$\eta_{gen}$	Generaattorin hyötysuhde.
$\eta_e$	Polttomootorin ja generaattorin yhteenlaskettu hyötysuhde.
$\eta_{mot}$	Polttomootorin hyötysuhde.
$\eta_{em}$	Sähkömootorin hyötysuhde.
$\eta_g$	Vaihteiston hyötysuhde.
$H_B$	Bensiinin lämpöarvo.
$H_D$	Dieselin lämpöarvo.
$b$	Polttoaineen ominaiskulutus.
$F_W$	Pyörällä vaikuttava voima.
$v$	Ajonopeus.
$F_r$	Vierinvastusvoima.
$f$	Vierinvastuskerroin.
$G_r$	Pyöränkuorma.
$m$	Ajoneuvon massa.
$g$	Putoamiskiihtyvyys.
$F_i$	Ilmanvastusvoima.
$\rho$	Ilman tiheys.
$c_W$	Ilmanvastuskerroin.
$A$	Otsapinta-ala.

## 1 Johdanto

Euroopan unionin asettama direktiivi 2014/94/EU määrittää tavoitteeksi vähentää liikenteen aiheuttamia kasvihuonepäästöjä 60 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon [1]. Tämä direktiivi pakottaa kehittämään teknologiaa ja etsimään vaihtoehtoisia ratkaisuja, joilla on mahdollista päästä asetettuun tavoitteeseen.

Nykyliikenteessä suurin osa ajoneuvoista on varustettu joko diesel- tai ottomoottorilla. Kiristyvät päästönormit vaativat monimutkaisen saastelaitteiston haitallisten päästöjen minimoimiseksi sekä yhä hienompia ruiskutuslaitteita ja pitkälle prosessoitua polttoainetta. Polttoaineiden kohdalla tämä tarkoittaa, että jalostusprosessi vaatii paljon energiaa suhteutettuna raakaöljybarrelista saatavaan polttoainesaantoon, eli polttoaineen prosessoinnissa syntyvät CO<sub>2</sub>-päästöt kasvavat myös [2].

Ajoneuvo tuottaa elinkaarensa aikana suurimman osan kasvihuonepäästöistä käyttö vaiheen aikana [3, s. 5414]. Nämä päästöt ovat suoraan polttoaineen polttamisesta syntyviä. Jos voitaisiin käyttää vähemmän jalostettua polttoainetta, saataisiin käytön aikaiset päästöt pienemmiksi, kun polttoaineen prosessoinnin yhteydessä syntyvät CO<sub>2</sub>-päästöt jäisivät pienemmiksi. Vähemmän jalostetun polttoaineen käyttö ei ole mahdollista modernien diesel- ja ottomoottorien kanssa. Tarvitaan erilainen moottoriratkaisu.

Tämä työ tarkastelee vaihtoehtona ulkoiseen palamiseen perustuvaa stirlingmoottoria. Stirlingmoottori tunnetaan hyvästä hyötysuhteestaan ja mahdollisuudesta käyttää mitä tahansa lämpölähdettä polttoaineenaan. Tavoite on selvittää stirlingmoottorin nykyinen kehityksen tila sekä mahdollisuus käyttää moottoria modernin sähköisen voimalinjan kanssa hybridikäytössä henkilöautossa. Työssä vertaillaan teoreettista stirlinghybridiä lähinnä oleviin hybridiajoneuvoihin, jotka on varustettu ottomoottorilla.

Koko työn ajan stirlingmoottoria tarkastellaan autoteknisestä näkökulmasta. Stirlingmoottorin muut sovellutukset, kuten lämpöpumput, jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Kuvitteellista autoa tarkastellaan kulkuneuvona, jonka maksimihuippunopeus on 120 km/h. Valinta on hyvin perusteltavissa polttoaineen kulutuksen näkökulmasta, kun kulutus lisääntyy rajusti ajonopeuden funktiona ilmanvastuksen kasvaessa.

Työn tilasi Neste Oyj:n tuotekehitysosastolta diplomi-insinööri Seppo Mikkonen.

## 2 Stirlingmoottori

Tämä luku perehdyttää ensin stirlingmoottorin historiaan, jonka jälkeen käsitellään moottorin peruskomponentit ja toimintaperiaate ideaalisen stirlingtyökierron kautta. Käytännön asettamat realiteetit jätetään ideaalisen työkierron tapauksessa huomioimatta ja nämä vaikutukset huomioiden saadaan todellinen työkierto. Stirlingmoottorista on olemassa muutama päätyyppi, jotka selostetaan omina alalukuinaan. Moottorista käsitellään vielä erilaiset kampikoneistovaihtoehdot sekä selostetaan lämmönvaihtimien tehtävät ja merkitys moottorin suorituskyvyn kannalta. Lopuksi käsitellään stirlingmoottoreiden yleisiä ominaisuuksia, jotka tekevät moottorista hyvin mielenkiintoisen otto- ja dieselmoottoreiden rinnalle.

### 2.1 Stirlingmoottorin historia

Robert Stirling patentoi vuonna 1816 ensimmäisen Stirling ilma-moottorin, jota hän kutsui nimellä Economiser. Veljensä Jamesin kanssa he jatkoivat moottorin kehittämistä patentoiden paremmat kehitysasteet vuosina 1827 ja 1840. Jälkimmäinen patentti koski Dundeen valimolle rakennettua 25 kW tehoista moottoria. Koko 1800-luvun stirlingmoottori kamppaili höyrykoneen kanssa jääden toiseksi. Moottorin yleistymistä estivät materiaali-ongelmat kuumassapäässä. [4, s. v, 2.]

Diesel-, otto- ja sähkömoottori syrjäyttivät höyrykoneen ja stirlingmoottorin 1900-luvulle tultaessa, ja stirlingmoottorin kehitys pysähtyi. Markkinoilla oli kuitenkin tarjolla vesipumppuja ja tuulettimia, joiden voimanlähteenä oli stirlingmoottori. [4, s. 3–5.]

Philipsin kehityslaboratorio Eindhovenissa alkoi n. 1935 kehittää generaattoria, jonka täytyi olla pieni, hiljainen ja lämpöenergialla käyvä. Generaattori tulisi toimimaan virtalähteenä radiolle maailman alueilla, joissa ei ollut vielä yhtenäistä sähköverkkoa. Generaattorin voimanlähteeksi valittiin stirlingmoottori, jossa uskottiin olevan potentiaalia hyvään hyötysuhteeseen silloisilla moderneilla materiaaleilla valmistettuna. Generaattori valmistui vasta 1950-luvun alkupuolella, jolloin transistori ja kuiva paristo olivat eliminoineet alkuperäisen tarpeen. Philips jatkoi moottorin kehittämistä tavoitteinaan erilaiset sovellukset ja suuremmat teholuokat. [4, s. 5–6.]



Philipsin kehitystyö synnytti monta uutta keksintöä ja patenttia stirlingmoottorista. Vuonna 1943 Van Weenan patentoi kaksitoimisen moottorin, jota alettiin hyödyntää vasta vuonna 1969 [5, s. 152]. Suurempien moottorien kehittämisen voidaan sanoa alkaneen 1954 Rolf Meijerin keksittyä Rhombic-kampikoneiston vuonna 1953 [4, s. 295; 5, s.156]. Edistyksellinen ”rullaava” tiiviste (engl. rolling seal) kehitettiin 1960 [4, s. 300–302]. Philips lopetti stirlingmoottorien kehityksen kokonaan 1979 [5, s. 157].

Philipsin keksinnöt herättivät yhdysvaltalaisien mielenkiinnon ja Philips solmi lisenssisopimuksen GM:n (General Motorsin) kanssa 1958, joka kesti vuoteen 1970 asti. GM:n pääkiinnostus oli aluksi avaruusteknologiassa, mutta myöhemmin kehitettiin myös sovelluksia vedenalle ja ajoneuvoihin [5, s. 156]. GM on toteuttanut vuonna 1969 prototyypin stirlingmoottoria voimanlähteenään käyttävästä hybridiautosta, nimeltään Stir-Lec 1. Moottorina oli GPU3-mallinen generaattori käyttöön suunniteltu moottori, joka tuotti noin 10 hevosvoiman tehon. Toteutus oli sarjahybridi, jossa moottori pyöritti ainoastaan generaattoria, joka latsi akkuja. Akkujen tasavirta muutettiin vaihtovirraksi ja ohjattiin ajo-moottoreina toimiville kolmivaihe sähkömoottoreille. [4, s. 327–328.]

Kiristynyt päästölainsäädäntö Yhdysvalloissa ajoi autonvalmistajia kehittämään vähemmän saastuttavia autoja. Ford Motor Companysta ja Philipsistä tuli yhteistyökumppanit 1972 kestäen vuoteen 1977 saakka. Viiden vuoden ohjelman aikana kehitettiin stirlingmoottoreita henkilöautokäyttöön, yhtenä vaihtoehtona matalapäästöiselle voimanlähteelle. [5, s. 158–159.] Ohjelmaa rahoitti Yhdysvaltojen energiaosasto DOE (Department of Energy) 180 miljoonalla Yhdysvaltain dollarilla [4, s. 6]. Yhteistyön suurin saavutus oli 50 000 mailin käyttötesti Ford Torinolle, johon oli asennettu Philipsin valmistama 4-215 moottori. Moottori oli kaksitoiminen, keinulevy-tyypin (engl. swash plate) kampikoneistolla, tuotti 125 kW tehoa ja maksimikierronnopeus oli 4000 r/min. Moottori oli kytketty perinteiseen mekaaniseen voimalinjaan. [4, s. 313–321.]

Philips solmi myös lisenssisopimukset ruotsalaisen United Stirling AB:n kanssa vuonna 1968 ja länsisaksalaisten MAN-MWM:n kanssa vuonna 1965. United Stirling AB on ruotsalaisen laivanrakentaja Kockumsin ja maanpuolustukseen liittyvän yhtiön FFW:n yhteenliittymä, joka aluksi kehitti pääasiassa moottoreita kuljetuskalustoon. MAN-MWM keskittyi kehittämään raskaiden koneiden moottoreita. [4, s. 6, 346; 5, s. 156.]

United Stirling kehitti aluksi yksitoimisia Rhombic-kampikoneistoisia beta-tyypin apumäntäisiä moottoreita, mutta siirtyi 1971 kehittämään kaksitoimisia moottoreita, koska

niiden paino-tehosuhde oli kaksinkertainen yksitoimisten vastaavista lukemista. Yhtiön kehittämä kaksitoiminen V4X31 moottori asennettiin Ford Pintoon 1972–1974, jolla ajettiin 400 mailia. Vuonna 1974 asennettiin Ford Taunukseen myös kaksitoiminen V4X35 moottori. United Stirlingin on ollut yhdessä MTI:n (Mechanical Technology Incorporated), American Motors Inc. ja NASA:n (National Aeronautics and Space Administration) kanssa Yhdysvaltojen Energiaosaston (DOE) rahoittamassa ohjelmassa, jossa on kehitetty moderneja vaihtoehtoisia ajoneuvomoottoreita. [4, s. 360 – 370.] Ajoneuvosovellusten kehittäminen tuntuisi päättyvän edellä mainitun ohjelman loputtu 1986. Ohjelman tuloksena syntyneestä Mod II –moottorista kerrotaan neljännessä luvussa enemmän.

Historian viimeiset 25 vuotta näyttävät stirlingmoottorin kehityksen keskittyneen tehotehdydeltään ja lämpötilaeroltaan pienempiin moottoreihin, mm. aurinkoenergian talteenottoon. Syitä korkean tehotehdyden ajoneuvomoottoreiden kehityksen lopettamiselle ovat olleet kilpailukyvyttömyys kustannuspuolella otto- ja dieselmoottoreita vastaan, tiivistysten kestoikä ja moottorin huono vaste [6, s. 112–113].

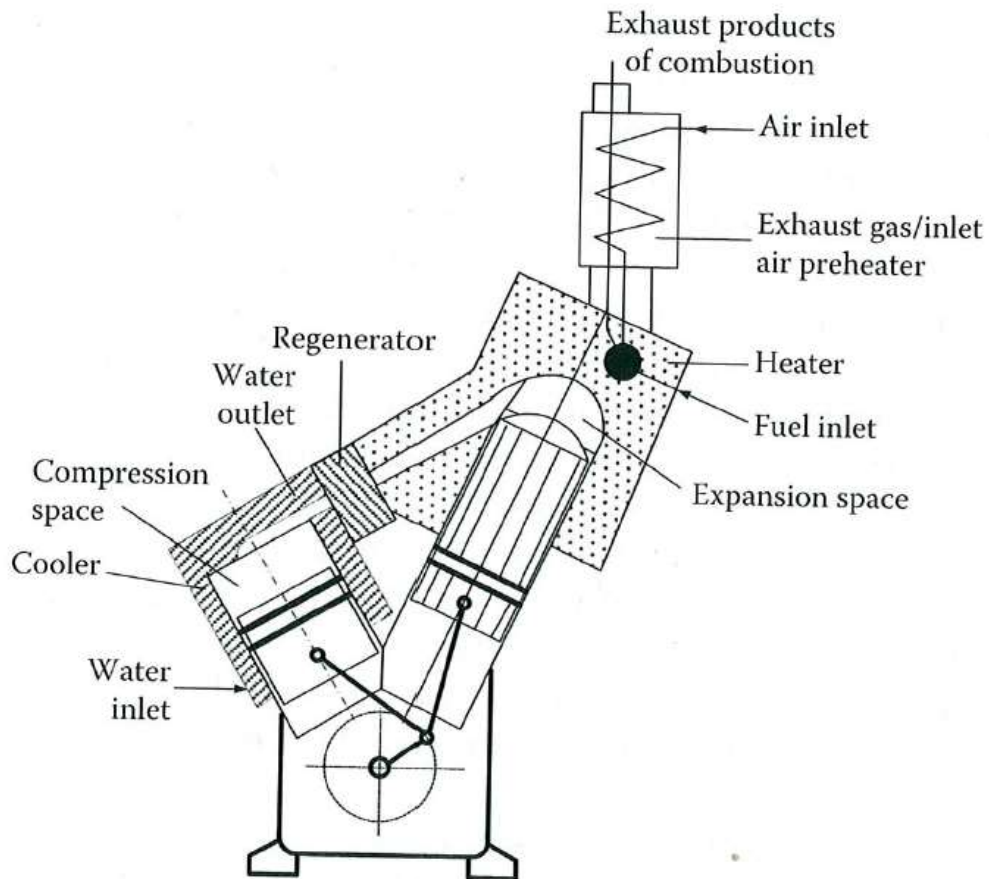
## 2.2 Stirlingmoottorin toiminta ja termodynamiikka

### 2.2.1 Yleistä

Stirlingmoottori on laite, joka toimii suljetun regeneroivan termodynaamisen syklin mukaisesti, jossa systeemissä oleva työaine (kaasu, usein vety tai helium) puristuu ja laajenee jaksottaisesti eri lämpötilatasoilla [4, s.1]. Työkaasun jaksoittainen jäähdytys ja kuumennus aikaansaavat paineenvaihtelun systeemissä. Paineen vaikutus mäntään saa aikaan mekaanista työtä, sekä tilavuuden muutoksen systeemiin. Tilavuuden muutokset aikaansaavat työkaasun virtauksen systeemissä.

Stirlingmoottorista on monia erilaisia rakenteita, mutta perinteisesti moottorin rakennetta kuvaillaan alla olevan kuvan 1 mukaisesti. Moottori on kaksimäntäinen, jossa sylinterit ovat V-asennossa. Männät on yhdistetty kiertokangilla yhteiselle kampiakselille. Moottorin toinen sylinteri on kuuma pää, jossa tapahtuu kaasun laajeneminen. Moottorin toinen sylinteri on kylmä pää, jossa tapahtuu kaasun puristaminen. Sylinterit on yhdistetty toisiinsa kanavalla, jonka välissä on lämmönvaraaja (engl. regenerator). Lämmönvaraaja toimii kylmän ja kuumen tilan välissä. Sylinterien välillä kiertää moottoriin tiivistetty kaasu,

joka virtaa kylmän- (jäähdytin) ja kuumanlämmönvaihtimen (lämmitin) sekä lämmönvaraajan lävitse. Kuumaalämmönvaihdinta lämmitetään jatkuvalla palamisprosessilla sylinterin ulkopuolelta ja kylmälämmönvaihdinta viilennetään joko vesikierrolla tai ilmalla.



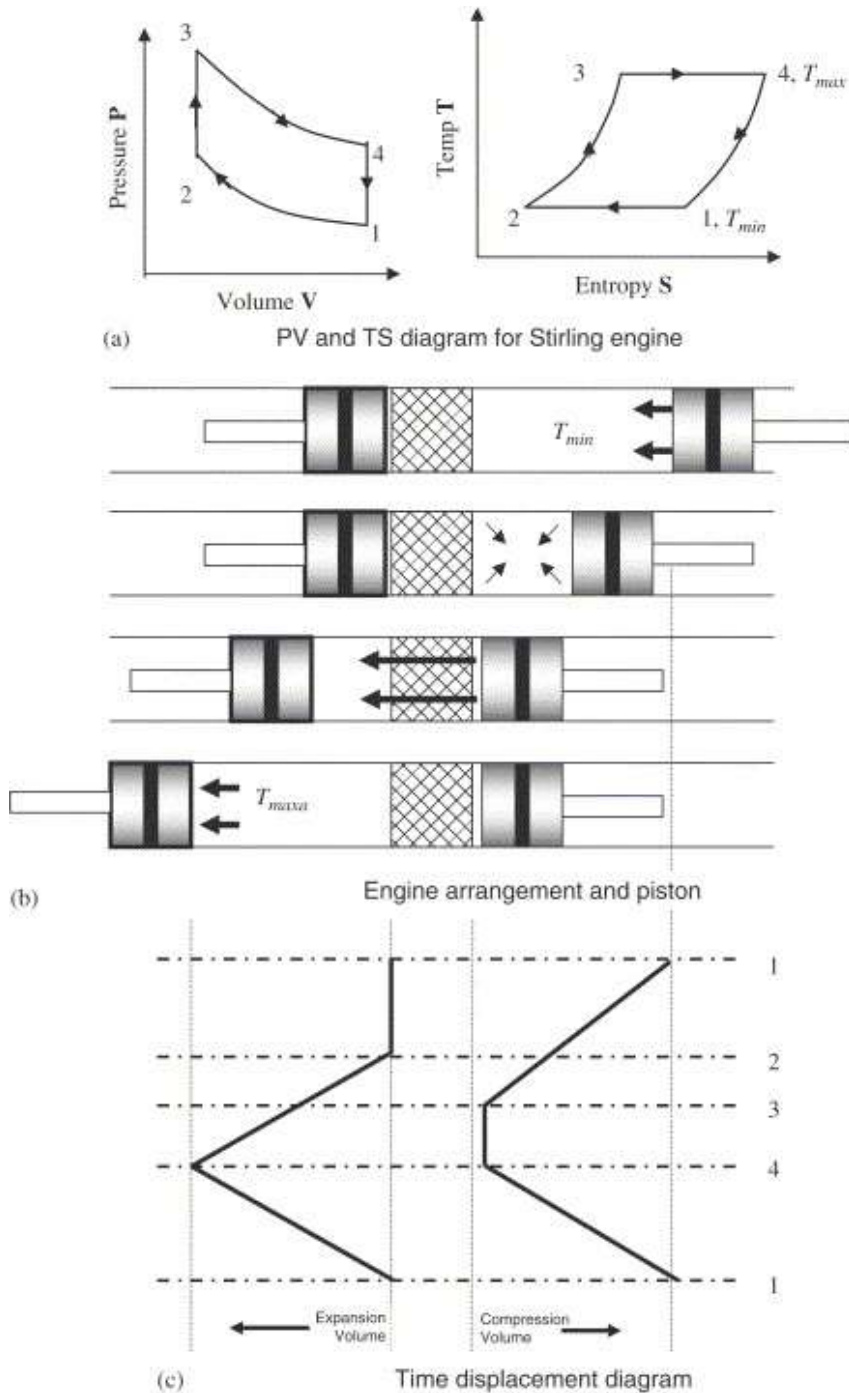
Kuva 1. Perinteinen stirlingmoottorin rakenne [6, s. 96].

### 2.2.2 Ideaalinen stirlingtyökierto

Stirlingmoottorin termodynaaminen perusta on ideaalinen stirlingtyökierto. Stirlingtyökierto kuvataan kahdella vastakkain asetetulla männällä samassa sylinterissä, joiden välissä on lämmönvaraaja, kuvan 2 mukaisesti. Korkea lämpötila  $T_{max}$  vallitsee laajentumistilassa, ja matala lämpötila  $T_{min}$  vallitsee puristustilassa. Lämmönvaraajan yli vaikuttaa siis lämpötilaero ( $T_{max} - T_{min}$ ), ja oletetaan, että lämpötila ei johdu pituussuunnassa.

Kierto alkaa kuvan puristustilan männän ollessa uloimmassa kuolleessa kohdassa ja laajentumistilan männän ollessa sisemässä kuolleessa kohdassa. Tilavuus on suurimmillaan ja kaikki työkaasu sijaitsee kylmässä puristustilassa. Samanaikaisesti paine

ja lämpötila ovat minimiarvoissaan, kuten kuvasta 2 nähdään. Puristusvaihe (prosessi 1-2) alkaa kun, puristustilan mäntä alkaa liikkua kohti sisempää kuollutta kohtaansa ja laajentumistilan mäntä pysyy paikallaan. Työkaasu puristuu kasaan puristustilassa, ja paine kasvaa tilavuuden pienentyessä. Lämpötila pysyy vakiona, koska lämpömäärä  $Q_C$  siirtyy puristustilasta ympäristöön entropian laskiessa.



Kuva 2. Ideaalinen stirlingtyökierto. a) P-V ja T-S kuvaajat, b) Mäntien sijainti kierron eri vaiheissa, c) Aika-iskutilavuuskuvaaja. [8, luku 2.]

Siirtovaihe (prosessi 2-3) alkaa, kun molemmat männät liikkuvat samanaikaisesti siten, että puristustilan mäntä liikkuu kohti lämmönvaraajaa ja laajentumistilan mäntä pois päin lämmönvaraajasta tilavuuden mäntien välillä pysyessä vakiona. Työkaasu pakotetaan siis siirtymään lämmönvaraajan lävitse puristustilasta laajentumistilaan työkaasun lämmetessä lämpötilasta  $T_{min}$  lämpötilaan  $T_{max}$ . Työkaasu sitoo energian lämmönvaraajaan varastoituneesta lämpöenergiasta. Lämpötilan nousu siirtymisen aikana vakio tilavuudessa saa aikaan paineen nousun. Tällöin myös entropia kasvaa.

Laajentumisvaihe (prosessi 3-4) alkaa, kun puristustilan mäntä on paikallaan sisemässä kuolleessa kohdassa ja laajentumistilan mäntä jatkaa liikettään kohti ulompaa kuollutta kohtaa. Tällöin tilavuus kasvaa ja paine putoaa. Lämpötila pysyy vakiona, koska lämpömäärä  $Q_E$  lisätään prosessiin ulkoisesta lähteestä. Entropia kasvaa.

Viimeinen prosessi kierrossa on siirtovaihe (prosessi 4-1), jolloin molemmat männät liikkuvat samanaikaisesti kohti kierron lähtötilannetta tilavuuden pysyessä vakiona. Tällöin työkaasu pakotetaan lämmönvaraajan lävitse, jolloin se luovuttaa lämpöenergiaa lämmönvaraajalle ja kaasun lämpötila laskee arvoon  $T_{min}$  saavuttaessa puristustilaan. Lämpötilan laskiessa myös paine laskee sekä entropia pienenee.

Kierto muodostuu siis neljästä lämpöä siirtävästä prosessista, joista prosessit 1-2 ja 3-4 ovat isotermisiä ja prosessit 2-3 ja 4-1 isokoorisia. Stirlingtyökierron hyötysuhde voidaan laskea samalla tavalla kuin Carnot'n-työkierron hyötysuhde:  $\eta = (T_{max} - T_{min})/T_{max}$ . Stirlingtyökierrolla saavutetaan siis sama hyötysuhde kuin Carnot'n työkierrolla. Kaksi isentrooppista prosessia on korvattu kahdella isokoorisella prosessilla, joka kasvattaa P-V kuvaajan pinta-alaa. Näin ollen ei tarvitse käyttää niin suurta painetta ja iskutilavuutta kuin Carnot'n työkierrossa. [4, s. 19.]

### 2.2.3 Todellinen kierto

Yllä esitetty ideaalinen stirlingtyökierto ei ota huomioon todellisia tekijöitä, jotka laskevat stirlingtyökierron hyötysuhdetta. Ideaalinen kierto antaa mallin, jonka mukaan todellinen moottori pyrkii toimimaan. Yksi merkittävä ero todellisen kierron ja ideaalisen kierron välillä on, että todellisuudessa puristusvaihe ja laajentumisvaihe ovat lähempänä adiabaattisia (ei lämmönsiirtoa) kuin isotermisiä prosesseja (ääretön lämmönsiirto) [4, s. 43].

Lämmönvaraaja oletetaan täydelliseksi, mikä tarkoittaa lämmönsiirtokyvyn lämmönvaraajan ja työkaasun välillä olevan äärettömän hyvä, eli lämmönvaraajan lämpökapasiteetti on ääretön. Ideaalisuus on mahdollista myös, jos työkaasun lämmönsiirtokyky on nolla. Käytännön lämmönvaraaja toimii hyvin kaukana ideaalilanteesta, mikä laskee hyötysuhdetta. Lisäksi työkaasun kulkiessa lämmönvaraajan läpi syntyy aerodynaamisia häviöitä, sekä lämmönvaraaja lisää kuollutta tilaa moottoriin (selostetaan edempänä). [4, s. 40; 6, luku 3.2.3.]

Puristus- ja laajentumisvaiheen todellisen adiabaattisen luonteen takia, lämmönvaraajan ja puristustilan sekä lämmönvaraajan ja laajentumistilan välillä on erillisiä lämmönvaihtimia (jäähdytin ja lämmitin), joita ei ideaalimallissa ollut. Lämmönvaihtimien tehtävä on siirtää työkaasuun lämpöä ja vastaavasti siirtää lämpöä pois kaasusta. Parantuva lämmönvaihto tuo mukanaan huonoja puolia: aerodynaamiset häviöt kasvavat, kuollut tila moottorissa kasvaa ja moottorin rakenteesta riippuen, lämmönvaihtimet voivat toimia kaksisuuntaisesti. Kaksisuuntaisuus tarkoittaa vaihtimien esimerkiksi jäähdyttävän regeneraattorilta tulevaa työkaasua, mutta samalla jäähdyttävän puristusvaiheen jälkeen työkaasua uudelleen, mikä huonontaa hyötysuhdetta. [4, s. 44–45.]

Kaikkea moottorissa poltetun polttoaineen lämpöenergiaa ei saada siirrettyä työkaasuun, vaan osa haihtuu lämpösäteilynä ja suurempi osa siirtyy pois pakokaasun mukana. Pakokaasujen sisältämä lämpöenergia käytetään kuitenkin hyödyksi tuloilman lämmittämiseen erillisellä lämmönvaihtimella, jonne tuloilma ja pakokaasut ohjataan. [4, s. 45–46.]

Moottorin kuollut tila on se tilavuus, joka ei kuulu moottorin yhteenlaskettuun iskutilavuuteen. Ideaalikierto ei ota huomioon kuollutta tilaa, jonka esimerkiksi lämmönvaraaja ideaalikiertoon tuo. Kuollutta tilaa moottorissa ovat siis välykset sylinterin ja männän välillä, kanavat, lämmönvaraaja ja mahdolliset lämmönvaihtimet. [4, s. 40–46, 203–205]. Kuollut tila vähentää moottorista saatavaa tehoa, mutta saattaa parantaa moottorin hyötysuhdetta riippuen siitä, missä kohtaa kuollut tila sijaitsee [8, luku 8.2].

Ideaalikierrossa mäntien liike on epäjatkovaa, eli kierron aikana toinen männistä on vuorollaan paikallaan. Todellisuudessa mäntien liike on jatkuvaa, mukaillen sinimuotoista liikettä. Ideaalikierrossa ei myöskään oteta huomioon kitkahäviöitä, lämmön johtumista moottorin sisäisistä elementeistä sekä mahdollista työkaasun vuotoa prosessista. [4, s. 40–46].

## 2.3 Moottorityypit

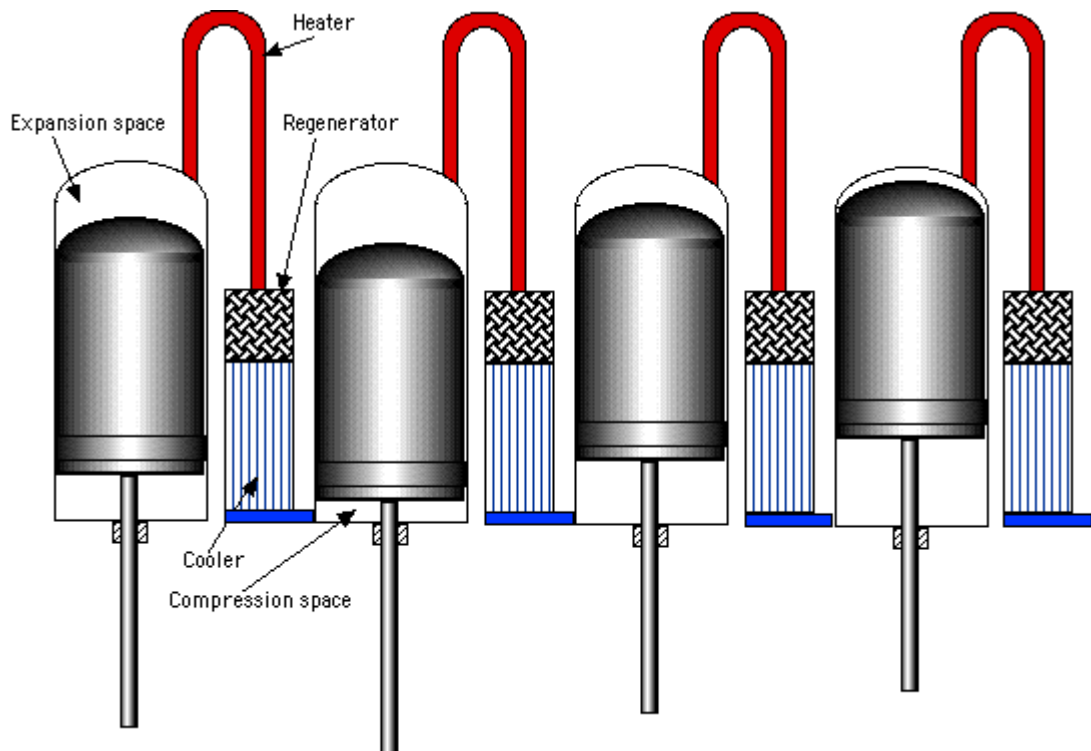
Stirlingmoottori koostuu kahdesta tilasta eri lämpötiloissa, joiden välistä tilavuutta voidaan vaihdella jaksottaisesti ja jotka on yhdistetty toisiinsa sisäisen lämmönvaihtimen, lämmönvaraajan, ja kahden ulkoisen lämmönvaihtimen kautta [4, s. 107]. Näistä komponenteista saadaan koottua yllättävän monta erilaista konstruktiota, joista moni on pelkkä konsepti. Kattava listaus mahdollisista konstruktioista on esitelty Walkerin kirjassa ”Stirling Cycle Machines” (1973).

Yleisesti moottorit voidaan jakaa kahteen tyyppiin: yksi- (engl. single-acting) ja kaksitoimisiin moottoreihin (engl. double-acting). Nimitykset tulevat moottorin toimintatavasta. Nykytutkimukset luokittelevat moottoreita lämpötilaeronsa mukaisesti kolmeen eri kategoriaan: matalan, keskitason ja korkean lämpötilaeron moottoreihin.

Yksitoimisessa moottorissa mäntä on kosketuksissa työkaasun kanssa vain toiselta puolelta. Tarkempi määritelmä kertoo moottorin olevan yksi- tai kaksisylinterinen, jossa on kaksi edestakaisin liikkuvaa elementtiä, joista molemmat ovat mäntiä (2-sylinterinen) tai toinen on apumäntä (engl. displacer) [4, s. 108]. Apumäntää käsitellään beta-tyypin moottorin yhteydessä tarkemmin.

Kaksitoimisessa moottorissa männän molemmat puolet ovat kosketuksissa työkaasun kanssa. Kuvasta 3 näemme, että kaksitoimisessa moottorissa sylinterin laajentumistila on yhdistetty lämmönvaraajan sekä ulkoisten lämmönvaihtimien kautta toisen sylinterin puristustilaan, sekä yhdessä sylinterissä on vain yksi edestakaista liikettä tekevä elementti. Kaksitoimisen moottorin suuri etu on, että edestakaista liikettä tekevien elementtien lukumäärä puolittuu yksitoimiseen verrattuna, joka yksinkertaistaa kampikoneistoa. Eniten kehitetty kaksitoiminen stirlingmoottori on United Stirlingin P40-moottori [8, luku 4.1]. P40-moottori toimi pohjana myöhemmin kehitetyille Mod-1 ja Mod-2 autonmoottoreille NASAn projektissa, jota referoidaan neljännessä luvussa myöhemmin [9].

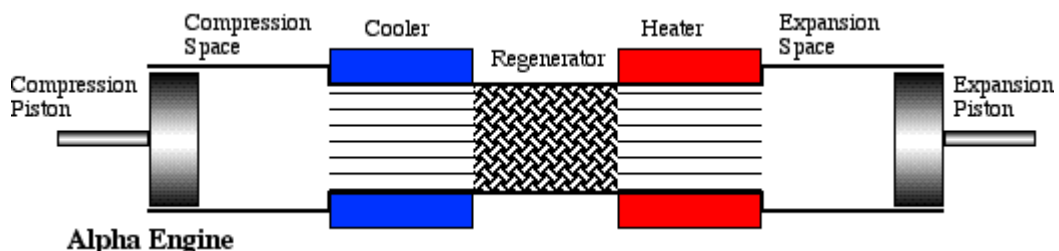
Seuraavissa alaluvuissa esitellään alfa- beta- ja gamma-tyypin mekaaniset moottorit lyhyesti sekä ns. vapaamäntä moottorityyppi. Viimeiseksi käsitellään lyhyesti muita vaihtoehtoisia moottorityyppejä.



Kuva 3. Alfa-tyyppin kaksitoiminen, 4-sylinterinen stirlingmoottori [10].

### 2.3.1 Alfa-tyyppi

Alfa-tyyppin moottori on yksinkertaisin stirlingmoottorin rakenne. Yksinkertaisimmillaan se koostuu kahdesta männästä erillisissä sylintereissä, niin että sylinterit on yhdistetty kanavalla toisiinsa, jossa on lämmitin, lämmönvaraaja ja jäähdytin. (Kuva 4.) Huono puoli rakenteesta on, että molemmat männät vaativat tiivistyksen, mutta vastaavasti alfa-tyyppi tuottaa suurimmat tehot muihin moottorityyppeihin verrattuna, johtuen suuremmasta puristussuhteesta [11, s. 19]. Alfa-tyyppin moottori on mahdollista rakentaa kaksitoimiseksi kuvan 3 mukaisesti, jolloin moottorista saadaan korkea ominaisteho esimerkiksi ajoneuvokäyttöön [8, luku 4.2.1].



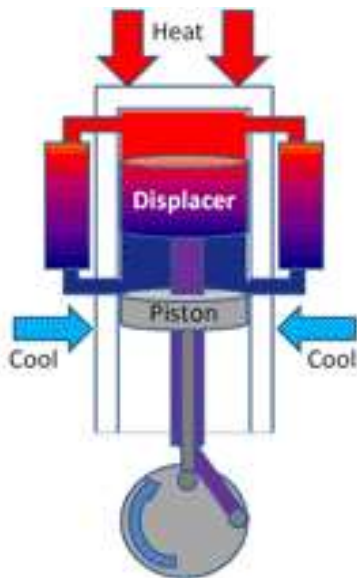
Kuva 4. Yksinkertainen alfa-tyyppin vastakkaismäntäinen stirlingmoottori [10].



### 2.3.2 Beta-tyyppi

Beta-tyypin moottorin rakenne koostuu männästä ja apumännästä samassa sylinterissä. Apumännän kampi kulkee männän läpi kuten kuvassa 5 ja on kytketty yhteiselle kampiakselille usein 90°:n vaihe-erolla. Lämmönvaraaja voi sijaita sylinterin ulkopuolella kuten kuvassa 5, sylinterin seinämässä tai apumännässä. Hyvänä puolena on, että edestakaisin liikkuvien osien tiivistys helpottuu: apumännän kampi on helpompi tiivistää määntään [4, s. 118]. Huonona puolena on vaikeus eristää sylinterin kuuma ja kylmä pää toisistaan, ettei lämpö johtuisi näiden välillä. Beta-tyypin moottoreista on tehty esimerkiksi linja-autoon prototyypimoottoreita Philipsin ja United Stirling AB:n toimesta. Moottorit olivat kuitenkin hyvin kalliita valmistaa, ja käytännössä kaksitoimiset alfa-tyypin moottorit ovat puolet edullisempia niin kooltaan, painoltaan kuin tehoiltaan. [4, s. 310, s. 364–365.]

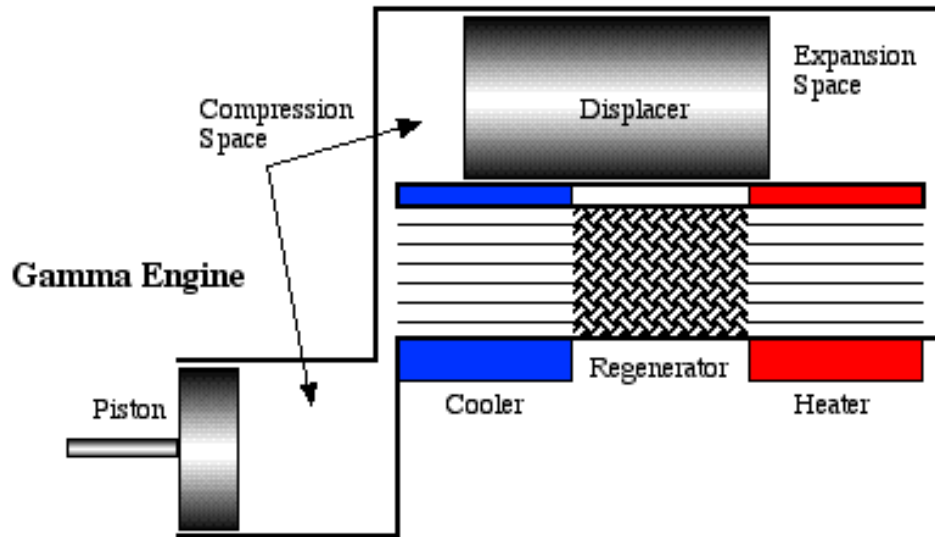
Apumännän tehtävä on kuljettaa työainetta kuumasta päästä kylmään päähän ja päinvastoin. Apumäntä onkin selvästi väljä sylinteriin verrattuna mäntään, jotta työkaasu pääsee kulkeutumaan apumännän ohi. Apumäntä ei tee työtä kaasuun. Apumäntä on rakenteeltaan kevyt ja tilavuudeltaan suuri.



Kuva 5. Beta-tyypin stirlingmoottori. Kaksiosainen lämmönvaraaja on sijoitettu sylinterin ulkopuolelle. [12]

### 2.3.3 Gamma-tyyppi

Gamma-tyypin moottorissa on mäntä ja apumäntä sijoitettuna eri sylintereihin kuvan 6 mukaisesti. Sylinterit jakavat yhteisen puristustilan, ja kanavassa sylintereiden välillä on lämmitin, lämmönvaraaja ja jäähdytin. Gamma-tyypin moottori mahdollistaa lämmönvaihtimien sijoittelun vapaammin sekä yksinkertaisemman kampikoneiston kuin beta-tyypin moottoreissa. Gamma-tyypin moottoreilla on usein suuri kuollut tila verrattuna beta- ja alfa-tyypin moottoreihin.



Kuva 6. Periaatekuva gamma-tyypin stirlingmoottorista. Kuvasta puuttuu apumännän veivi. [13]

### 2.3.4 Vapaamäntäinen stirlingmoottori ja muut sovellukset

Kaikki edellä esitetyt moottorityypit ovat olleet mekaanisesti kytkettyjä kampikoneistoon tuottaen työnä pyörivää liikettä ulostuloakseliilta. Stirlingmoottorin on mahdollista toimia myös niin, että mäntä tai apumäntä ei ole kytketty mekaanisesti. Tällöin puhutaan männän olevan vapaana, ja tällaisesta moottorityypistä käytetään nimitystä vapaamäntäinen stirlingmoottori (engl. Free Piston Stirling Engine). Vapaus tarkoittaa tässä tapauksessa, että mäntä on vapaa mekaanisesta kytkennästä mutta dynaamisesti kytketty kaasuun. Rakenne on ideaalinen mäntä-apumäntäkonfiguraation kanssa, mutta sylinteri on umpinainen molemmista päistään ja mekaanisia kytkentöjä ei ole. [8, luku 4.3.4.1.] Moottorin keksi William Beale 1950-luvun lopulla [4, s.256].

Vapaamäntäisen moottorin edut ovat osien olematon kuluminen, joka tuottaa pitkän käyttöiän ja huoltovapauden sekä potentiaalinen hyvään hyötysuhteeseen. Huonoja puolia ovat vaikeus synkronoida männän ja apumännän liike niin, että niiden liikkeen välinen

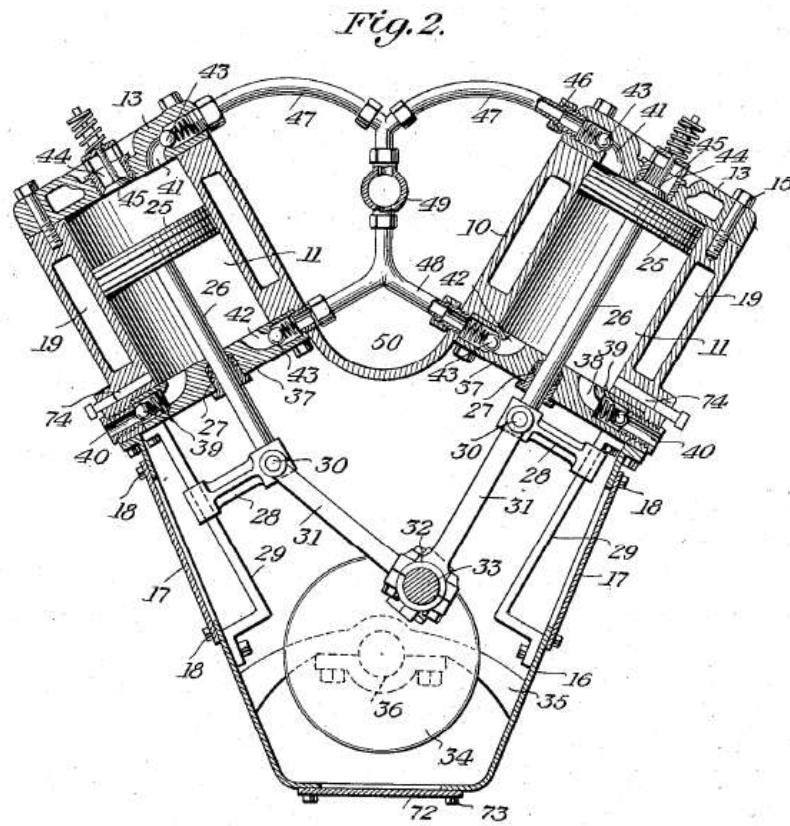
vaihe säilyy samana. Vapaamäntäistä moottoria käytetään mm. lineaarisena vaihtovirta-generaattorina aurinkoenergia- ja CHP (Compined Heat and Power) -sovelluksissa sekä erilaisina pumppuina. [14, s. 599–601.]

Stirlingmoottorista on kehitetty mielenkiintoisia konsepteja, joista valitettavan harvasta on tehty prototyyppiä. Calgaryn yliopistossa on ollut projekti kaksoiskierronmäntämoottorista, joka toimii stirlingtyökierron mukaisesti. Prototyyppiä ei tiettävästi koskaan valmistettu [4, s. 115–116]. Mielenkiintoisia stirlingmoottorikonsepteja on myös Quasiturbiini-kierronmäntämoottorista, joka teoreettisesti tarjoaa paljonkin etuja esimerkiksi työkaasun tiivistysongelmaan [15].

## 2.4 Kampikoneistotyypit

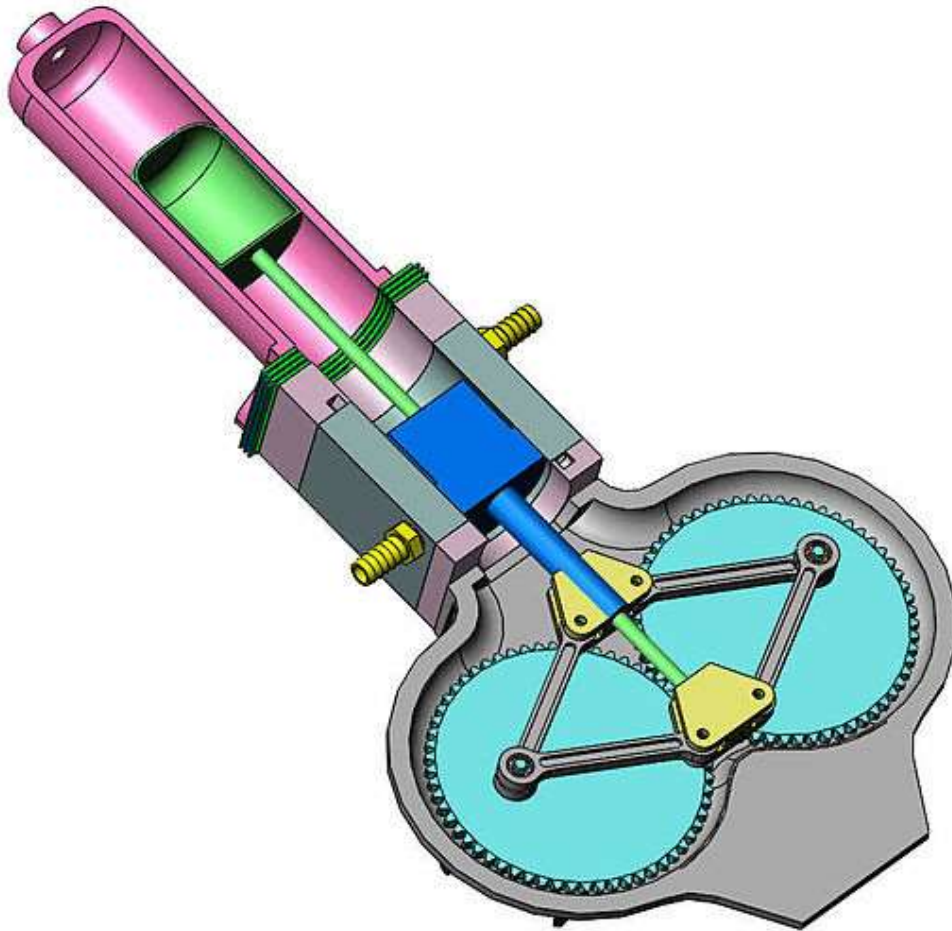
Stirlingmoottoreiden erilaiset moottorityypit mahdollistavat myös erilaisia kampikoneistovaihtoehtoja. Perinteinen kampiakseli-kiertokankiyhdistelmä, joka on lähes jokaisessa otto- ja dieselmoottorissa, on mahdollinen myös stirlingmoottorissa. Hyvänä puolena on luotettavuus, hyvä valmistettavuus ja pienet valmistuskustannukset. Huonoina puolina on hankala tasapainottaminen ja vaikeus käyttää beta-tyyppin apumäntärakenteen kanssa. [8, luku 4.3.1.]

Pelkkä kampiakseli-kiertokankiyhdistelmä aiheuttaa mäntään sivuvoimia, jotka aiheuttavat männän tiivistysongelmia: työkaasu kulkeutuu kampikammioon ja voiteluöljy työtilaan. Männän sivuvoimista päästään eroon lisäämällä ristikappale (engl. crosshead) kiertokangen päähän, josta lähtee erillinen männänvarsi, kuten kuvassa 7 esitetään. Ristikappaleen käyttö eliminoi myös ongelman voiteluöljyn kulkeutumisesta työtilaan. Huonona puolena on moottorin korkeuden kasvaminen, jota voidaan kompensoida käyttämällä suurta porausta ja lyhyttä iskua, joka samalla laskee männän nopeutta ja vähentää tiivisteiden kulumista. Ristikappalerakennetta käytetään kaksitoimisten suurempien alfa-tyyppisten moottorien yhteydessä. [6, s. 58–59.]



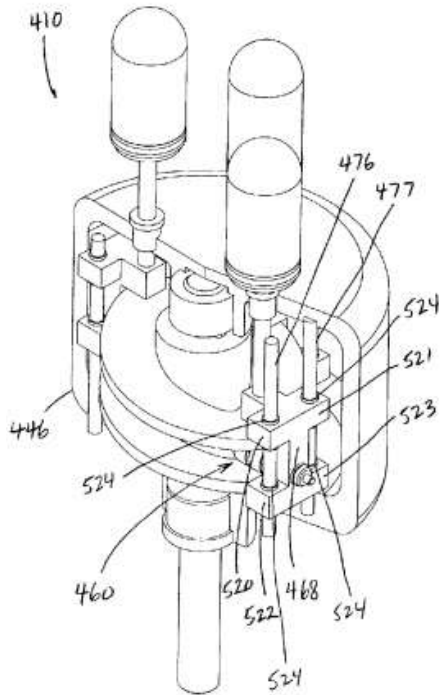
Kuva 7. Periaate yksinkertaisesta ristikkapaleella varustetusta kampikoneistosta Bob Nealin patentoimasta kompressorista [16].

Beta-tyypin stirlingmoottoriin kehitetty Rhombic-kampikoneisto tasapainottaa männän ja apumännän edestakaisen liikkeen sylinterissä täydellisesti, eikä sivuttaisvoimia esiinny kummallakaan elementillä. Itse koneisto on kuvan 8 kaltainen koostuen kahdesta päinvastaiseen suuntaan pyörivästä hammasrattaasta ja kiinteistä tangoista koostuvasta mekaniismista, kytkien männän ja apumännän hammasrattaisiin. Koneiston tuottama männän ja apumännän liike on lähes sinimuotoista niin, että apumäntä kulkee edellä n. 90° (riippuen mekaniismin geometriasta). Koneisto koostuu monesta laakeripisteestä ja vaatii tarkat valmistustoleranssit, mikä nostaa valmistuskustannuksia. [6, s. 59–60.]



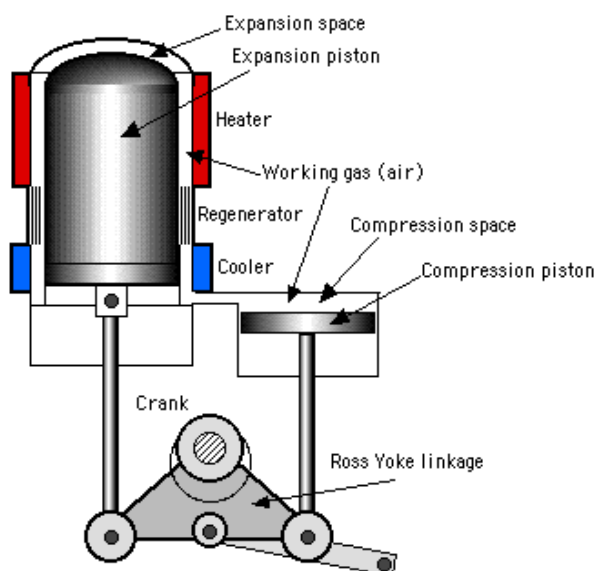
Kuva 8. Rhombic-kampikoneistoinen beta-tyypin moottori [17].

Kaksitoimisten moottoreiden kanssa on käytetty keinulevykoneistoa erityisesti ajoneuvo-sovelluksissa. Keinulevy muuttaa mäntien edestakaisen liikkeen pyöriväksi liikkeeksi. Keinulevykoneistossa on keinulevy kiinnitetty akseliin vinoon kulmaan kuvan 9 mukaisesti ja pyöriessään saa aikaiseksi mäntien edestakaisen liikkeen sylintereissä. Keinulevyn etuna on liikkeen kohtisuoruus, joka ei aiheuta mäntään sivuvoimia, jolloin tiivisteet kestävät pitempään. Moottori saadaan keinulevyn avulla rakennettua kompaktiin kokoon, ja moottorin tasapainotus yhdelle levyn kulmalle on mahdollista. Rakenteen valmistus on kalliimpi perinteiseen kampiakseli ratkaisuun verrattuna. [8, luku 4.3.3.]



Kuva 9. Stirlingmoottorin keinulevy koneisto [18].

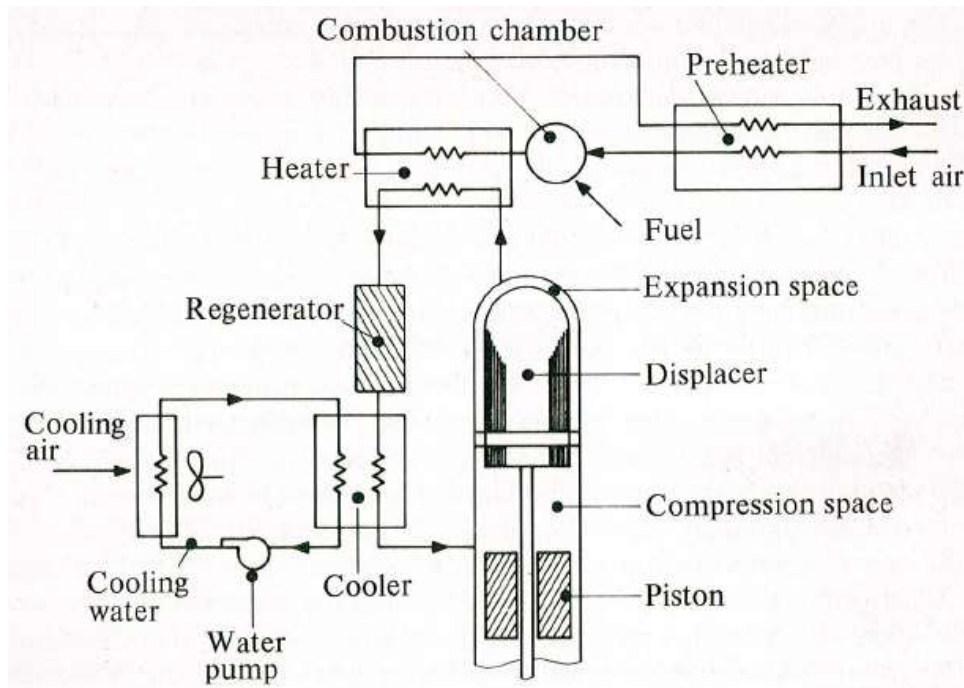
Kiinnostava ratkaisu on Ross Yoke -mekanismi, jonka on keksinyt Andrew Ross 1970-luvun lopulla. Mekanismi on kolmion muotoinen (kuva 10), jossa kolmion ylimpään kulmaan on kiinnitetty kampiakseli ja sen alapuoliselle sivulle tukinivel. Kolmion alakulmiin on kiinnitetty kiertokanget. Rakenne on hyvin kompakti ja mahtuu pieneen tilaan. Mekanismin tasapainotus on vaikeaa ja laakerivoimat kasvavat suuriksi, mikä rajoittaa moottorin käyttämisen ainoastaan pienissä moottoreissa (alle 1 kW). [6, s. 60–61.]



Kuva 10. Ross Yoke -mekanismi alfa-tyypin moottorissa [9].

## 2.5 Lämmönvaihtimet

Lämmönvaihtimet ovat stirlingmoottorin avainkomponentteja. Lämmönvaihtimia on stirlingmoottorin yhteydessä vähintään kolme, mutta usein viisi, kun lämmöntuonti tapahtuu pakokaasua tuottavia energialähteitä käyttämällä. Lämmönvaihtimia ovat lämmitin, jäähdytin, lämmönvaraaja sekä mahdollinen tuloilman esilämmitin ja jäähdytysveden oma jäähdytin, jotka on esitetty kuvassa 8.



Kuva 11. Stirlingmoottorin lämmönvaihtimet [4, s. 125].

Lämmittimen tehtävä on absorboida lämpöenergiaa itseensä korkeassa lämpötilassa ja siirtää se mahdollisimman suurella hyötysuhteella työkaasuun. Jäähdyttimen tehtävä on päinvastainen eli absorboida lämpöenergiaa työkaasusta ja siirtää se mahdollisimman suurella hyötysuhteella kylmään jäähdytysnesteeseen.

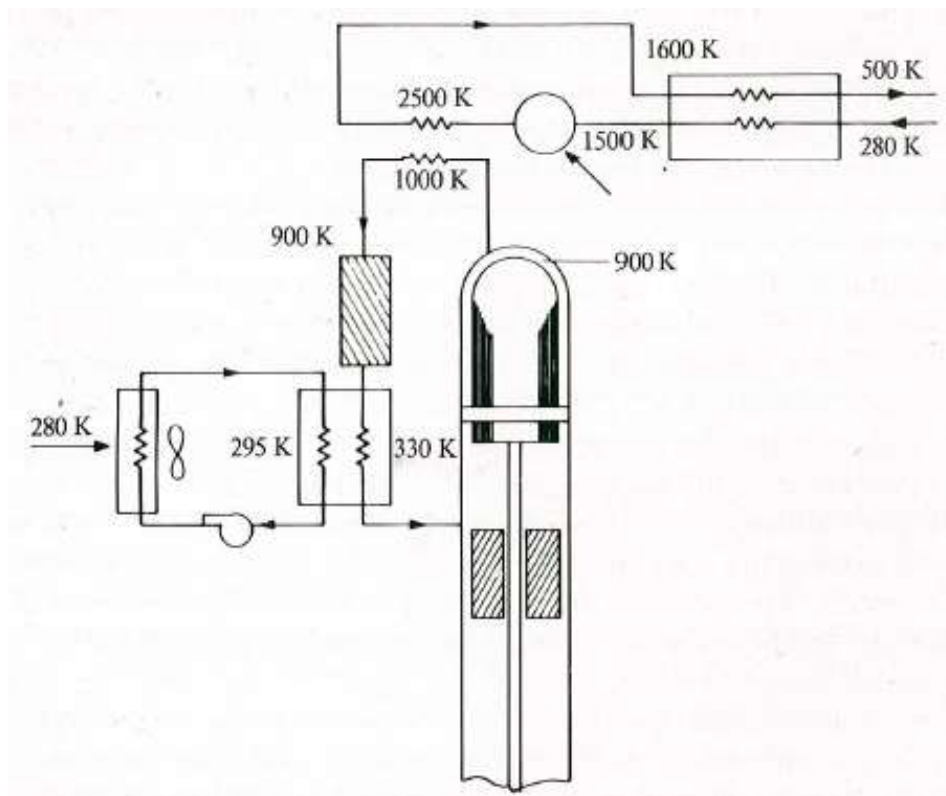
Lämmönvaraaja toimii kuin termodynaaminen ”sieni” vastaanottaen ja luovuttaen lämpöenergiaa työkaasulle. Kuumasta työkaasusta lämmönvaraaja absorboi lämpöenergiaa ja vastavuoroisesti luovuttaa lämpöenergiaa kylmälle työkaasulle. Lämmönvaihtimen läpi siirtyvät energiamäärät ovat todella suuria, n. 3–4-kertaisia verrattuna lämmittimen läpi siirtyvään energiaan [4, s. 125]. Seuraavaksi luetellut ominaisuudet ovat suotavia lämmönvaraajan rakenteelle:

- suuri ja yhtenäinen rakenne (mahdollisimman suuri lämpökapasiteetti)

- pieni ja huokoinen rakenne (mahdollisimman pienet virtaushäviöt)
- pieni ja tiivis rakenne (minimaalinen kuollut tila)
- suuri ja hienojakoinen rakenne (maksimaalinen lämmönsiirtokyky)
- esteetön rakenne (epäpuhtauksien kertymisen ehkäisy).

Käytännössä näitä vaatimuksia on mahdoton täyttää, joten käytännön lämmönvaraaja on aina kompromissirakenne. [4, s. 149–151.]

Tuloilman esilämmittimen läpi ohjataan palotapahtuman kuumat pakokaasut, joiden lämpöenergialla lämmitetään moottoriin tulevaa ilmaa. Tuloilman esilämmitin ei ole moottorin toiminnan kannalta pakollinen tekijä, mutta se parantaa termistä hyötysuhdetta. Kuvassa 9 on esitetty tyypillisen korkean lämpötilaeron omaavan moottorin lämpötilat eri lämmönvaihtimissa kelvinasteissa.

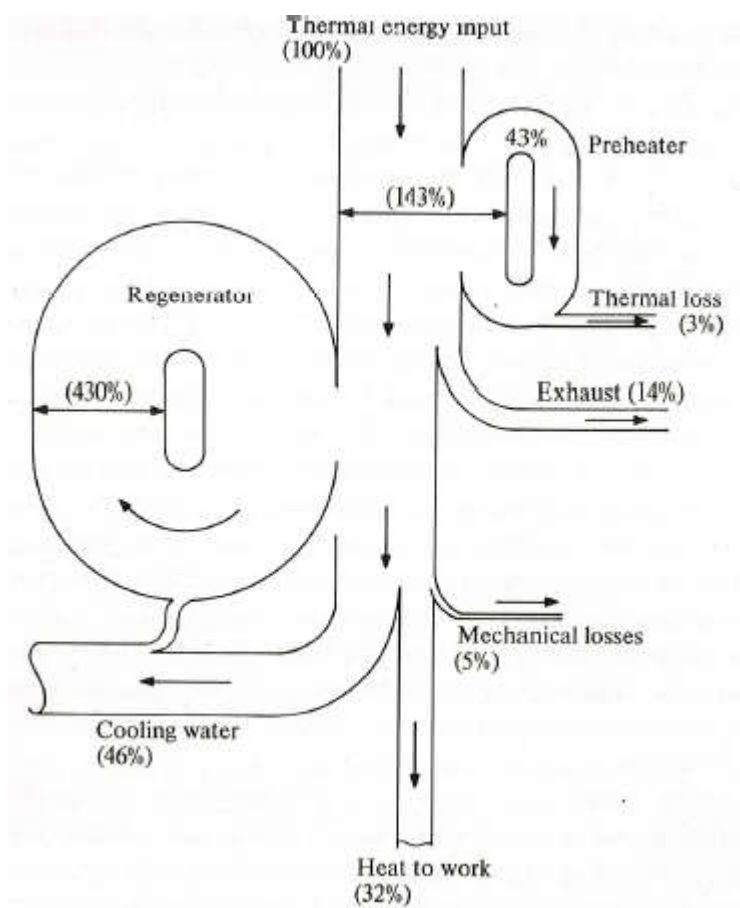


Kuva 12. Korkean lämpötilaeron omaavan moottorin lämpötila jakauma eri puolilla moottoria [4, s.126].



Huomattavaa on tuloilman esilämmittimen tehokkuus, kun tarkastellaan lämpötilanmuutosta tuloilmassa ja pakokaasussa. Huomion arvoista on myös lämpötilaero lämmittimen pinnalla ja itse työkaasussa, joka näyttäisi lämmönvaihtimen olevan hyvin tehoton koska lämpötilaero on 1500 astetta. Työaineena käytetään kovassa paineessa olevaa heliumia tai vetyä, joilla on erinomaiset lämmönsiirto ominaisuudet verrattuna pakokaasuihin ulkoilman paineessa. Tämä selittää suuren lämpötilaeron lämmittimen pinnan ja työkaasun välillä. [4, s. 127.]

Jäähdytysveden kierto on oma erillinen suljettu systeeminsä, jossa on erillinen ilma-ve-sityyppinen jäähdytin. Systemi on samankaltainen kuin otto- ja dieselmoottoreissa sillä erotuksella, että lämpötilat pyritään pitämään niin alhaisina kuin mahdollista. Tämä tarkoittaa luonnollisesti jäähdytysjärjestelmältä vaadittavan enemmän jäähdytystehoa kuin otto- ja dieselmoottoreissa vaaditaan. Tilanteesta antaa hyvän kuvan energian virtauskaavio stirlingmoottorissa, joka on esitetty kuvassa 10.



Kuva 13. Energiavirtaukset stirlingmoottorissa [4, s. 128].

Kaaviossa on ylhäällä syötetty energiamäärä (100 %), johon tuloilman esilämmityksen aikaansaama lämmitys tuo 43 % lisää energiaa. Tästä määrästä (143 %) häviää lämpöhäviöinä n. 3 %. Pakokaasut vievät esilämmittimen jälkeenkin 14 % lämpöenergiasta pois systeemistä. Lämmönvaraaja kierrättää systeemissä n. 4-kertaisen lämpöenergian, kuten aikaisemmin mainittiin. Kaavion alalaidassa nähdään, että 5 % energiasta häviää mekaanisiin häviöihin, 32 % lämmöstä työksi ja jopa 46 % jäähdytysveden mukana.

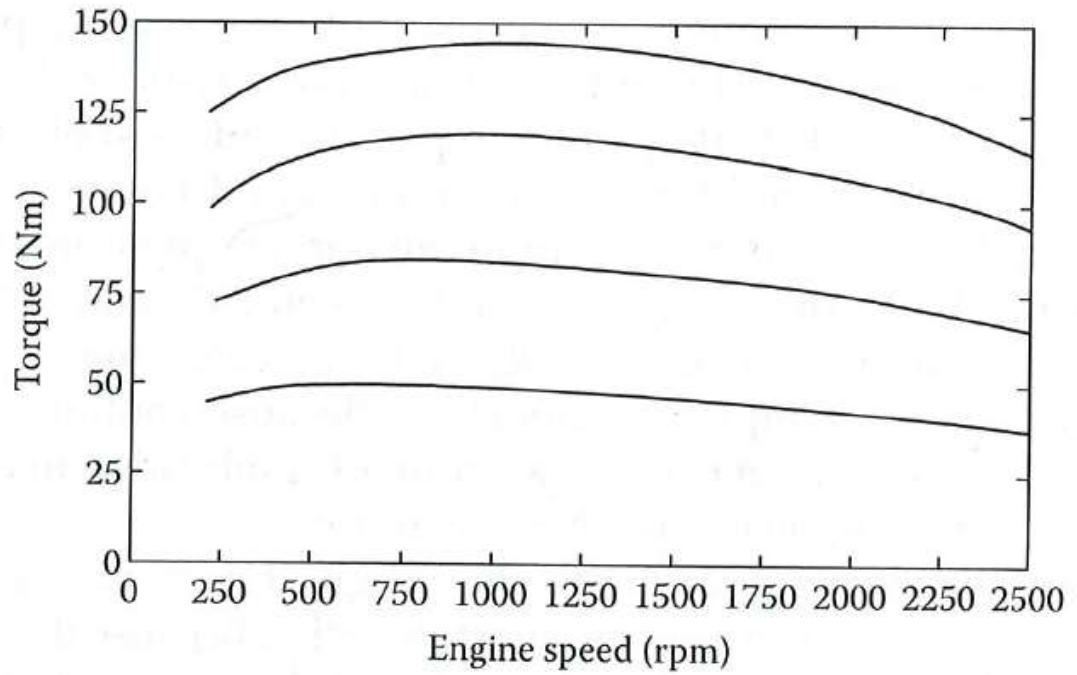
Kaavio osoittaa tärkeän eron diesel- ja stirlingmoottorin välillä. Dieselmoottorissa energiakaavio jakautuu karkeasti niin, että kolmasosasta saadaan työtä, kolmasosa häviää pakokaasujen mukana ja kolmasosa absorboituu jäähdytysveteen [4, s. 128]. Dieselmoottorissa palaminen tapahtuu sylinterin sisällä, jolloin ei ole lämmitintä, johon syntynyt lämpö tulisi siirtää. Lämpö, joka ei muutu työksi, siirrettään joko pakokaasujen tai jäähdytysveden mukana pois. Stirlingmoottorissa palaminen tapahtuu sylinterin ulkopuolella, jolloin kaikki lämpöenergia, joka karkaa pakokaasujen mukana, on suoraan häviötä, jota ei saada siirrettyä lämmittimen kautta työkaasuun. Jos pakokaasujen mukana karkaava energia saataisiin supistettua, se kasvattaisi moottorista saatavaa työtä ja samalla jäähdytysjärjestelmän kuormaa entisestään. [4, s. 128–129.] Karkeasti stirlingmoottori tarvitsee kaksi kertaa suuremman jäähdytysjärjestelmän kuin tehoiltaan ja kooltaan saman kokoinen dieselmoottori [6, s. 76].

## 2.6 Stirlingmoottorien yleisiä ominaisuuksia

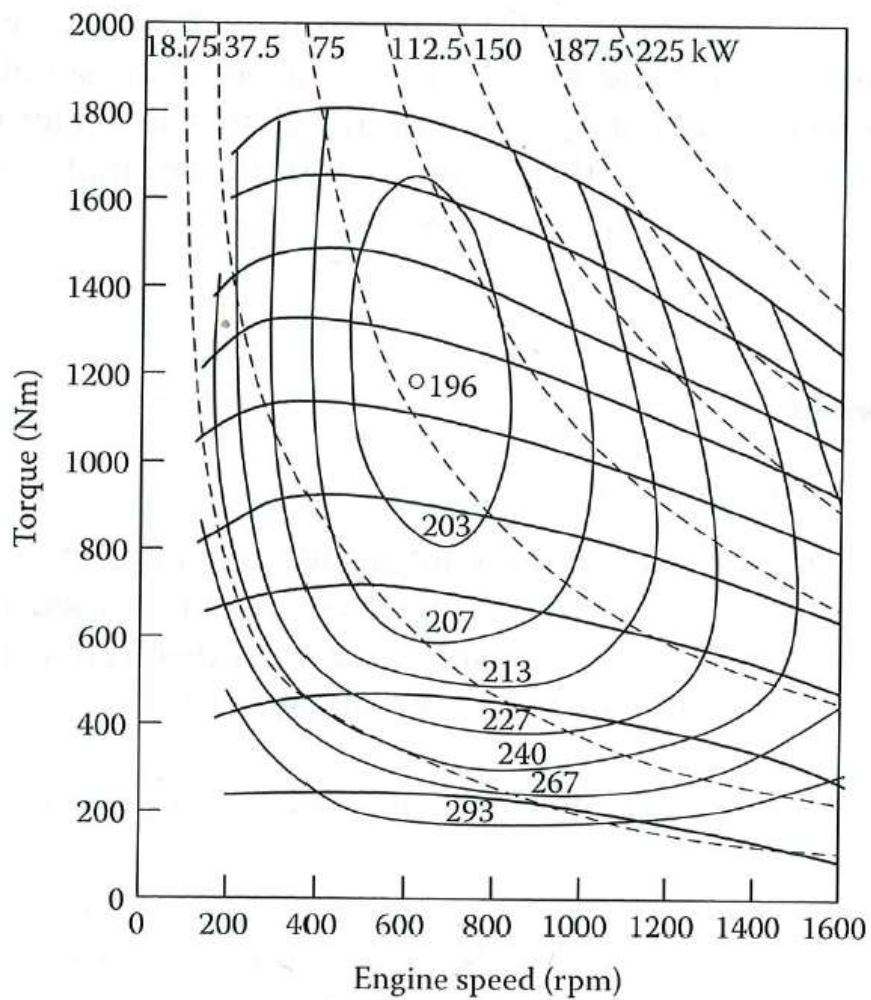
### Vääntömomentti-pyörintänopeuskuvaajat ja ominaiskulutuskartta

Stirlingmoottoreiden vääntömomentti-pyörintänopeuskuvaajat ovat kuvan 14 mukaisesti hyvin tasaisia. Alhaisilla pyörintänopeuksilla saavutettavat suuret vääntömomentit ovat otollisia ajoneuvosovelluksiin. Stirlingmoottorit tuottavat myös edullisen, jaksottaisen vääntövaihtelun ulostuloakselilla verrattuna otto- ja dieselmoottoriin, minkä ansiosta voidaan käyttää paljon kevyempiä vauhtipyöriä [4, s. 210–212].

Tyypillisen stirlingmoottorin polttoaineen ominaiskulutuskartta on esitetty kuvassa 15. Stirlingmoottorin suhteellisen vakiona pysyttelevä terminen hyötysuhde suurella osalla moottorin pyörintänopeus aluetta [4, s. 213], muodostaa polttoaineen ominaiskulutuskartassa olevan ominaiskulutuspisteen ympärille laajan alueen, joka on otollinen taloudelliselle osakuormitusajolle. Tämä on erittäin otollinen ominaisuus verrattuna otto- ja dieselmoottoreiden vastaaviin ominaiskulutuskarttoihin [6, s. 109–100].



Kuva 14. Tyypillisiä vääntömomentti-pyörintänopeuskuvaajia stirlingmoottoreille [6, s. 99].



Kuva 15. Polttoaineen ominaiskulutus kartta 4-sylinterisestä stirlingmoottorista [6, s. 99].

## Moottorin ääni

Stirlingmoottorit ovat hyvin hiljaisia verrattuna otto- ja dieselmoottoreihin. Stirlingmoottorissa palaminen tapahtuu jatkuvalla prosessilla lämpöeristetyssä (samalla vaimennetussa) palotilassa vallitsevassa ulkoilman paineessa, kun taas otto- ja dieselmoottorissa jaksottaisesti kovassa paineessa. Stirlingmoottorissa ei ole myöskään ääntä synnyttävää venttiilikoneistoa ja sitä pyörittäviä mekanismeja. Äänenvaimentimia ajoneuvokäytössä ei tarvita. Stirlingmoottoreiden värähtely on paljon vähäisempää johtuen liikkuvien osien pienemmistä kiihtyvyyksistä verrattuna otto- ja dieselmoottoreihin.

## Moottorin käynnistys

Stirlingmoottori vaatii toimiakseen riittävän lämpötilaeron. Tästä johtuen moottorin käynnistäminen vaatii kuumapään osien lämmittämisen ennen käynnistystä. Moottorin käynnistymisen hitaus onkin yksi stirlingmoottorin haittapuolia. Riittävän lämpötilaeron lisäksi moottori vaatii vielä erillisen starttimoottorin käynnistyäkseen liikkuvien osien inertiaasta johtuen. Poikkeuksena on vapaamäntäinen stirlingmoottori, joka käynnistyy itseksensä pienen inertiaansa ansioista.

Philipsin ja Fordin yhteistyön aikana eräänä tavoitteena oli saada ajoneuvo 15 sekunnissa lämmityksen aloituksesta ajettavaan tilaan 21 °C:n lämpötilassa. Tietävästi koskaan ei ajoneuvoa saatu käynnistettyä alle 20 sekunnissa. Käynnistymisen hitaus olikin yksi suuri ongelma saada silloiset kuluttajat uskomaan stirlingmoottoriin ajoneuvokäytössä. [6, s. 82.]

Stirlinghybridin kanssa ongelma häviäisi, koska kuumapään lämmittämisen aikana ajaminen voidaan tehdä akustossa olevan varauksen energialla, kunhan akustossa on varaukselta lyhyen ajan ajoon. Ajon loputtua lämmittimessä oleva lämpöenergia on mekaanisen vaihteiston kanssa mennyt hukkaan, kun moottorista vielä saatavaa työtä ei ole voitu käyttää hyödyksi. Hybridin kanssa tämäkin energia saataisiin talteen lataamalla akkuja ajon loputtua.

## Moottorin vaste

Ajoneuvokäytössä perinteisen mekaanisen voimalinjan kanssa moottorin tulee kyetä vastaamaan nopeisiin nopeuden tai kuorman muutoksiin. Generaattorikäytössä, jossa moottoria pyritään käyttämään tasaisella pyörintänopeudella, tulee moottorin kyetä vastaamaan nopeisiin kuorman muutoksiin. Stirlingmoottorin ensimmäinen tapa säätää kuormitusta on polttoaineen määrän säätö, jolla suoraan säädetään lämmittimen lämpötilaa. Vasteaika on kuitenkin pitkä, ja moottori tarvitseekin usein toisen järjestelmän rinnalle. Tämän takia stirlingmoottoriin on kehitetty erilaisia säätöjärjestelmiä, joilla moottorin vaste muuttuvaan kuormaan tai nopeuteen saadaan toivotuksi. Järjestelmiä on monenlaisia riippuen kampikoneistosta ja moottorityypistä sekä sovelluksesta. Erilaisia järjestelmiä esitellään tarkemmin Walkerin kirjassa ”Stirling Engines” luvussa 10 [4].

## Laaja polttoaineskaala

Sylinterin ulkopuolinen palaminen mahdollistaa lähes minkä vain lämpöä tuottavan polttoaineen käytön. Polttoaineina voidaan käyttää kaasumaisia, nestemäisiä ja kiinteitä polttoaineita sekä esimerkiksi hukkalämpöä ja aurinkoenergiaa. Ajoneuvokäytössä polttoaineella tulisi olla riittävän suuri energiasisältö, koska polttoainetta tulee kuljettaa ajoneuvossa. Tämä rajaa monia energialähteitä ulkopuolelle.

## Päästöt

Stirlingmoottorin jatkuva palotapahtuma tuottaa huomattavasti vähemmän haitallisia päästöjä kuin otto- ja dieselmootoreiden palotapahtumat. Vuonna 1972 mitattiin Ford Torinosta Philipsin 4-215-moottorilla [4, s. 217–218] HC (palamattomat hiilivedyt), CO (hiilimonoksidi) ja NO<sub>x</sub> (typen oksidit) -päästöt ja tulokset alittavat nykyisen Euro 6 -päästöasetuksen [19] vaatimukset HC- ja CO-päästöjen osalta, mutta NO<sub>x</sub>-päästöt ovat olleet hieman korkeampia, kuten taulukossa 1 on esitetty.

Taulukko 1. Stirlingmoottorin tuottamat päästöt verrattuna Euro 6 -päästöasetukseen.

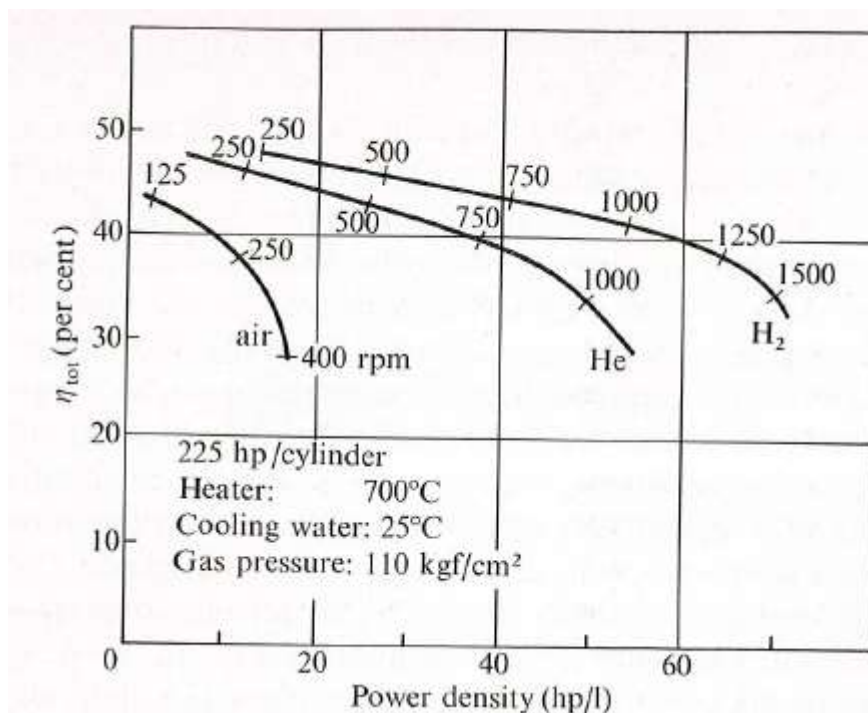
	<b>Ford Torino, 4-215.</b> <b>(g/km)</b>	<b>Euro 6 M1, bensiini</b> <b>(g/km)</b>
<b>CO</b>	0,192	1,0
<b>HC</b>	0,062	0,1
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,109	0,06

Huomionarvoista on, että mitatut arvot saavutetaan ilman katalysaattoria tai muitakaan saastelaitteistoja, joita otto- ja dieselmoottoreiden kanssa käytetään.  $\text{NO}_x$ -päästöjä saadaan oleellisesti vähennettyä, kun syntyneitä pakokaasuja ryhdyttämään kierrättämään palotapahtumaan uudestaan, joka laskee palotapahtuman lämpötilaa. Idea on täysin sama kuin otto- ja dieselmoottoreissa tehdään.

### Työkaasut

Stirlingmoottorin työkaasulta vaaditaan neljää ominaisuutta, jotka ovat ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, viskositeetti ja tiheys. Suuri ominaislämpökapasiteetti sekä hyvä lämmönjohtavuus vaaditaan mahdollisimman tehokkaan lämmönsiirron takia ja pieni viskositeetti sekä tiheys mahdollisimman pienen aerodynaamisen kitkan takia. [4, s. 168–169]. Tämän takia työkaasuna käytetään hyvin usein heliumia tai vetyä, joilla nämä ominaisuudet ovat erinomaiset ilmaan verrattuna.

Käytetyllä työkaasulla ei ole suurta vaikutusta moottorista saatavaan tehoon matalan litratehon (kW/l) moottoreissa. Työkaasun merkitys korostuu, kun litratehot kasvavat, kuten kuvassa 15 on esitetty. Käytännössä ajoneuvosovelluksissa ainut työkaasuvaihtoehto on vety.



Kuva 16. Laskennallinen tulos työkaasun merkityksestä litratehon ja kokonaishyötysuhteen funktiona [4, s. 106].

## Tiivistys

Stirlingmoottoreiden varmasti suurin ongelma on työkaasun tiivistys moottorin työtilaan. Kun tavoitteena ovat suuret litratehot, täytyy käyttää työkaasuna molekyylipainoltaan kevyttä vetyä paineistettuna kovaan paineeseen (jopa 200 bar). Tiivistystä vaikeuttaa edestakainen ja jatkuva männän liike yhdistettynä korkeaan lämpötilaan. Tiivisteeltä vaaditaan kykyä pitää kevyt työkaasu moottorin työtilassa, matalakatkaisuutta ja kykyä säilyttää ominaisuutensa ilman voitelua sekä pitkää elinikää ilman huollon tarvetta. [6, s. 100.]

Tiivistämisen nykytilanteesta on hyvin ristiriitaista tietoa eri lähteissä tai faktaa siitä, onko ongelmaan löytynyt ratkaisua. NASAn Mod II -loppuraportti vuodelta 1986 kertoo tiivisteiden eliniän olevan yli 2000 tuntia [9, s. 1], joka kuulostaa hyvinkin lupaavalta. Walkerin, Readerin ja Binghamin mukaan taas vuonna 1994 luotettavia tiivisteitä ei ole vuosikymmenien kehitystyöstä huolimatta onnistuttu kehittämään [6, s. 100]. Mielenkiintoista on kuitenkin, että ruotsalaisen Cleanergy AB:n alfa-typin moottoreissa käytetään vetyä ja heliumia CHP (Combined Heat and Power) ja CSP (Concentrated Solar Power) -soveluksissa nykypäivänä [20; 21]. Nämä moottorit toimivat kuitenkin pienemmällä lämpötilaeroilla, paineilla ja pyörintänopeuksilla kuin ajoneuvokäyttöön suunniteltu Mod II, minkä tähden eivät ole kovin mielekkäitä verrattavia. Molemmat moottorit ovat kuitenkin kaupallisia tuotteita, joilla on 25 vuoden elinkaariodotus, mikä tekeekin niiden teknologiasta mielenkiintoisen. Inresol AB:n teknologiajohtaja Stefan Larsson-Mastonstråle sanoo vedyn tiivistämisen nykyään olevan teknisesti täysin mahdollista, mutta nostavan moottoreiden valmistuskustannuksia paljon [22].



### 3 Modernien hybridautojen voimansiirtototeutukset

Hybridauto terminä kertoo auton koostuvan kahdesta tai useammasta voimalinjasta. Useimmiten hybridauto koostuu kuitenkin vain kahdesta voimalinjasta, koska kombinaatio muuttuu hyvin monimutkaiseksi muutoin. Hybridauto, jossa on sähköinen voimalinja, on hybridi-sähköauto, mutta yleisesti puhutaan vain hybridautosta, kuten tässäkin työssä. Hybridauton tarkoitus on hyödyntää molempien voimalinjojen hyvät ominaisuudet samalla vähentäen voimalinjojen huonojen ominaisuuksien vaikutuksia.

Perinteinen sähköinen voimalinja koostuu yksinkertaisesti voimanlähteestä, eli akustosta, sähkömoottorista ja mekaanisesta vaihteistosta, jota sähkömoottori käyttää. Voimalinja vaatii toimiakseen energianmuuntoyksikön akuston ja sähkömoottorin väliin, joka muuttaa akuston sähköenergian moottorille sopivaksi. Moottoria ohjaa moottorinohjainlaite ja energian käyttöä säätelee energianhallintalaite. Sähköinen voimalinja antaa mahdollisuuden jarrutusenergian talteenotolle, joka tarkoittaa kykyä muuttaa jarrutustilanteessa jarrutusenergia sähkömoottorin välityksellä sähköenergiaksi ja edelleen akuston varaukseksi. Tämä regeneroiva jarrutus on sähköisen voimalinjan suuri etu mekaaniseen voimalinjaan verrattuna. [7, s. 105–107.]

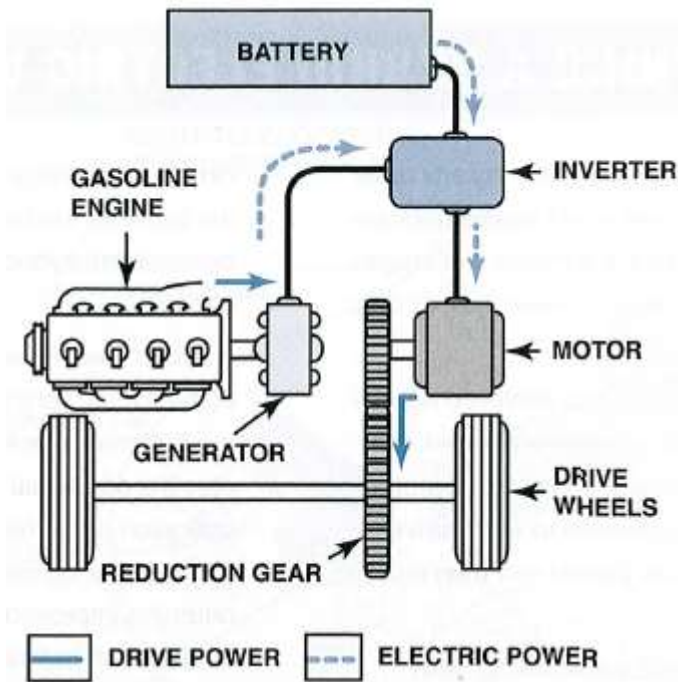
#### 3.1 Hybridautojen luokittelu

Hybridautot jaetaan kolmeen eri luokkaan rakenteensa mukaan: sarjahybridi, rinnakkaishybridi ja sarjaan-rinnakkaishybridi. Nimitykset perustuvat energian virtaukseen rakenteessa, joka samalla määrittää komponenttien sijoittelun.

Sarjahybridissä sähkömoottori on kytketty suoraan vaihteistoon, jolloin ajo tapahtuu kokonaan sähkömoottorin tuottamalla momentilla, kuten kuvassa 17 on esitetty. Sähkömoottori ottaa energiansa sähköenergian muuntimen kautta akustolta tai polttomoottorin pyörittämältä generaattorilta. Jarrutustilanteessa jarrutusenergia muunnetaan sähkömoottorin ja sähköenergian muuntimen kautta akustolle varaukseksi. Polttomoottori toimii sarjahybridissä sähköntuottajana systeemille ladataen akkuja ja tuottaen virtaa sähkömoottorille. [7, s. 127.]

Sarjahybridi on kuin sähköauto, jolla on oma latausjärjestelmänsä koko ajan mukana. Polttomoottorin toimiessa generaattorina voidaan polttomoottoria ajaa sen parhaalla

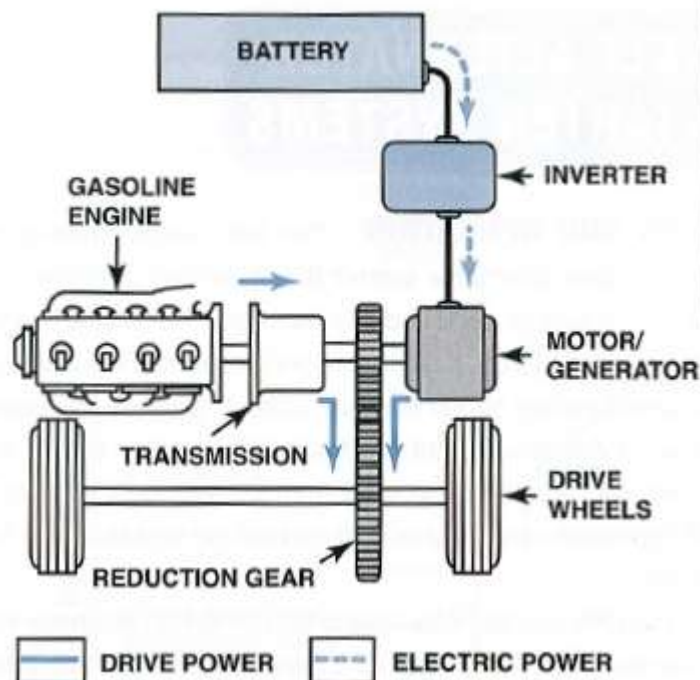
hyötysuhdealueella. Ajon tapahtuessa sähkömoottoreilla ei tarvitse käyttää monipykäläisiä vaihteistoja johtuen sähkömoottoreiden hyvistä ominaisuuksista. Jotta sarjahybridi säilyttää toimintakykynsä vaativissakin olosuhteissa (jyrkkä ylämäki), täytyy akusto olla kapasiteetiltaan riittävä ja sähkömoottori riittävän tehoinen, mikä luo haasteen sarjahybridin suunnittelulle. Myös energian muunto mekaanisesta sähköiseen ja sähkömoottorin välityksellä jälleen mekaaniseen luo häviöitä systeemiin. [7, s. 128–130.]



Kuva 17. Sarjahybridin yksinkertaistettu rakenne bensiinimoottorilla varustettuna [23, s. 22].

Rinnakkaishybridissä sähköinen ja mekaaninen voimalinja on kytketty yhteiseen mekaaniseen laitteeseen, jossa liike yhdistetään ja viedään vaihteistolle, kuten kuvassa 18 esitetään. Polttomoottori tuottaa vain mekaanista liikettä ja sähkömoottori toimii rinnalla ns. auttavana elementtinä. Autoa voidaan myös ajaa yksinään pelkällä sähkö- tai polttomoottorilla.

Rinnakkaishybridissä ei tarvita erillistä generaattoria, mikä pienentää kokoonpanon painoa sekä sähkömoottorin käyttö rinnalla mahdollistaa pienemmän polttomoottorin käytön. Suurin huono puoli on perinteinen mekaaninen kytkentä polttomoottorin ja renkaiden välillä, joka estää moottorin käytön parhaalla hyötysuhde alueella. Ongelmia voi tuottaa myös kompleksinen rakenne ja voimalinjojen ohjaus. [7, s. 130–131.]

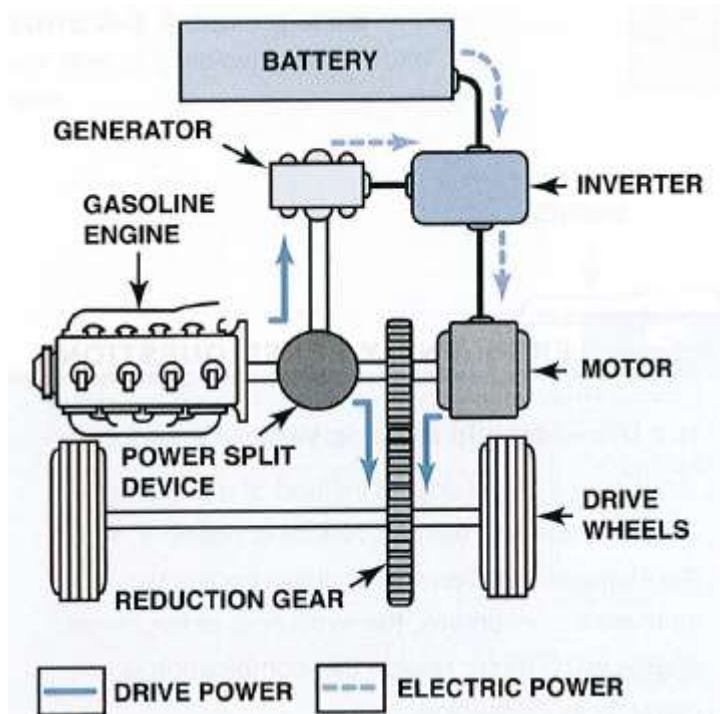


Kuva 18. Rinnakkaishybridin yksinkertaistettu rakenne bensiinimoottorilla varustettuna [23, s. 23].

Sarja-rinnakkaishybridissä nimensä mukaisesti yhdistyy elementtejä molemmista aiemmin esitellyistä vaihtoehdoista. Polttomoottoria voidaan käyttää suoraan kytkettynä vaihteistoon tai tuottamaan sähköä generaattorilla käyttämällä. Rakenteeseen on tuotu voiman jakava laite, joka jakaa polttomoottorin tuottaman momentin joko generaattorille tai vaihteistolle. Muuten rakenne koostuu kaikista elementeistä mitä sarja- ja rinnakkaishybrideissäkin on.

Sarja-rinnakkaishybridi yhdistelee parhaat puolet molemmista yksinkertaisemmista vaihtoehdoista. Polttomoottori kykenee toimimaan normaaliajossa parhaalla hyötysuhde alueella tuottaen sähköä, avustamaan ajamista vaativissa ajo-olosuhteissa, jolloin ei tarvitse käyttää niin suurta akustoa ja tehokasta sähkömoottoria. Toisaalta rakenteeseen kuuluu generaattori sekä mekaaninen osa, joka syö saatua painoetua akustosta. Lisäksi rakenne on kalliimpi kuin yksinkertaisemmat vaihtoehdot sekä paljon monimutkaisempi järjestelmien ohjauksen kannalta.

Ajoneuvojen hybridijärjestelmistä voi lukea tarkemmin Ehsanin, Gaon ja Emadin kirjasta "Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles" luvusta 5 [7].



Kuva 19. Sarja-rinnakkaishybridin periaate bensiinimootorilla varustettuna [23, s. 24].

### 3.2 Stirlingmoottorin yhdistäminen sähköiseen voimalinjaan

Edellä esitetyistä hybridautojen rakenne mahdollisuuksista paras vaihtoehto stirlinghybridiksi on ehdottomasti sarjahybridi. Kytkemällä stirlingmoottori generaattorin käyttäjäksi sarjahybridiin, päästään eroon monesta haittapuolesta, joita aikaisemmin ajoneuvokäytössä on ilmennyt mekaanisen voimalinjan kanssa.

Suurin etu on päästä eroon laajasta pyörintänopeusalueesta, joka on välttämättömyys mekaanisen voimalinjan kanssa. Generaattori käytössä voidaan stirlingmoottoria käyttää vakiokierrosmoottorina parhaalla hyötysuhdealueella. Moottori voidaan suunnitella vain vakiokierroskäyttöä varten ja tarve monimutkaisille pyörintänopeuden säätöjärjestelmille poistuu. Yksinkertaisempi suunnittelu ja monen säätöjärjestelmän systeemistä eroon pääsy laskee moottorin kustannuksia. Stirlingmoottorin hybridikäyttö eliminoi myös moottorin hitaan käynnistymisen ongelmat, kun ajaminen on mahdollista välittömästi akustossa olevalla energialla.

## 4 Stirlingmoottorivaihtoehtoja

Tässä luvussa esitellään edistyksellisin henkilöauton stirlingmoottori Mod II, johon viitattiin toisessa luvussa useaan otteeseen. Moottori oli tulos DOE:n rahoittamasta yhteistyöprojektista, jossa olivat mukana päätoteuttajana NASA sekä muina toimijoina United Stirling AB, MTI ja American Motors Inc. Lisäksi luvussa tutustutaan nykymoottorivalmistajien moottoreihin, niiden käyttötarkoituksiin ja ominaisuuksiin tarkastellen niiden mahdollista soveltuvuutta hybridautokäyttöön.

### 4.1 Mod II -henkilöautomoottori

DOE:n rahoittama ohjelma, jossa kehitettiin vaihtoehtoisia ajoneuvomoottoreita perinteisen otto- ja dieselmoottorin rinnalle ympäristösyiden vuoksi, alkoi vuonna 1978 ja kesti vuoteen 1986. Ohjelman tavoitteena oli mm. 30 % pienempi polttoaineenkulutus bensiinimoottoriin verrattuna. Lisäksi auton tuli vastata kaasuun ja käyttäytyä kuten bensiinimoottori, täyttää sen aikaiset päästönormit sekä olla luotettava, hiljainen ja kilpailukykyinen hinnaltaan. Mod II -stirlingmoottori asennettiin etuvetoiseen Chevrolet Celebrityyn ja sitä vertailtiin 4-sylinteriseen 2,5-litraiseen ottomoottoriin, joka Celebrityyn oli saatavilla. Stirlingmoottori oli varustettu perinteisellä nelivaihteisella manuaalivaihteistolla.

#### AUTOMOTIVE STIRLING ENGINE TECHNOLOGY PROGRESSION

	<u>1978</u>	<u>1986</u>
Weight/Power	8.52 kg/kW (14 lb/hp)	3.35 kg/kW (5.5 lb/hp)
Manufacturing Cost*	\$5000+	\$1200
Acceleration 0-97 km/h (0-60 mi/h)	36 s	12.4 s**
Combined Fuel Economy	8.1 km/L (19 mi/gal)	17.5 km/L (41 mi/gal)
Rare Metals	Cobalt	None
Seal Life	100 h	2000+ h

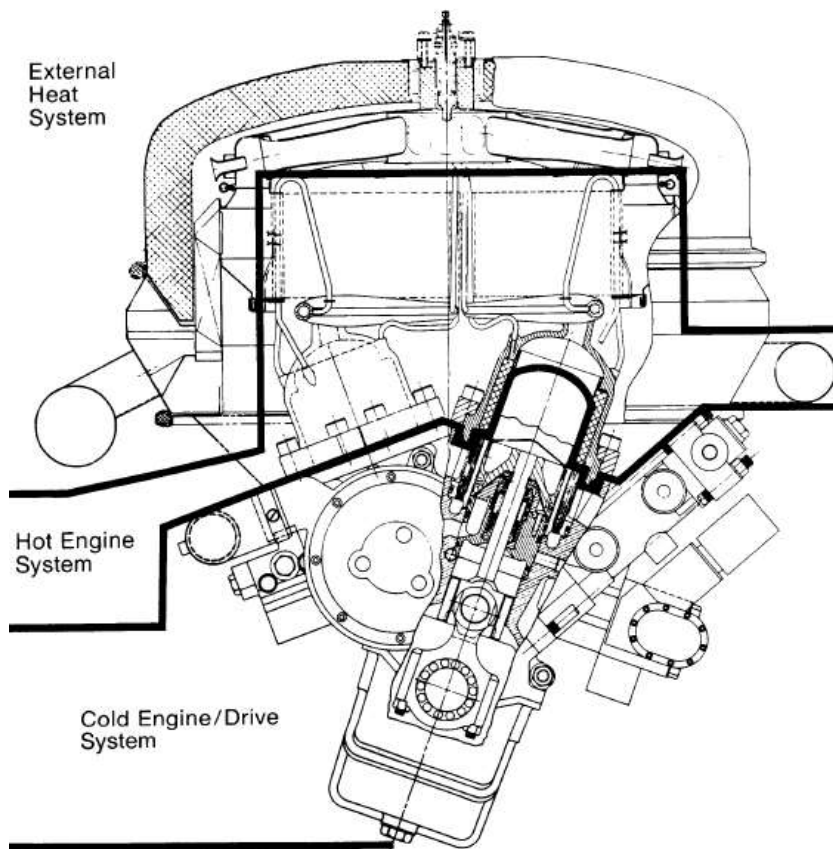
\*Based on 300,000 units per year

\*\*1417-kg (3125-lb) car

Kuva 20. Ajoneuvo stirlingmoottorien kehitys ohjelman aikana [9, s. 1].

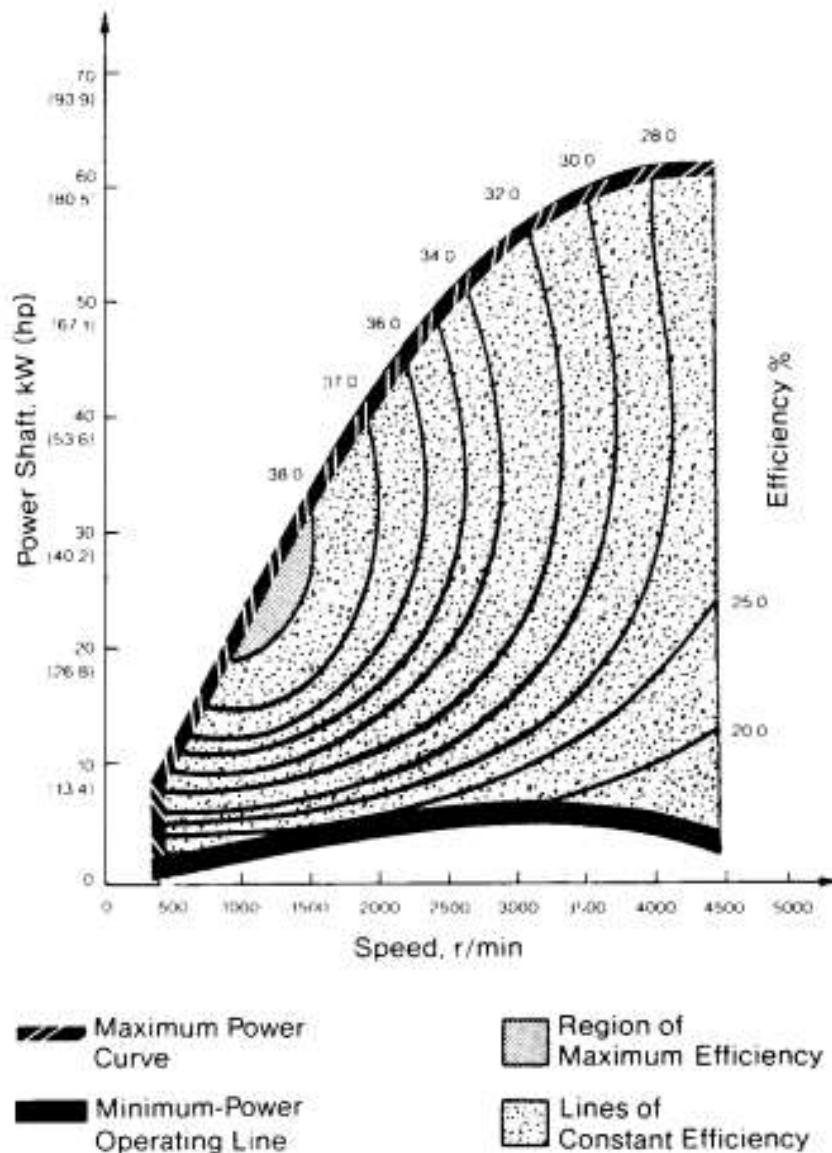
Kuvassa 20 on havainnollistettu ajoneuvokäyttöön suunniteltujen stirlingmoottorin kehitystä ohjelman aikana. Hyvin kiinnostava arvo on paino-tehosuhde, joka pudonnut yli viisi kilogrammaa kilowattia kohden sekä polttoaineenkulutus, joka muutettuna yleisempään muotoon  $\frac{L}{100 km}$ , on vuonna 1978 ollut 12,35  $\frac{L}{100 km}$  ja 5,71  $\frac{L}{100 km}$  vuonna 1986.

Tiivisteiden kestossa on tapahtunut myös merkittävää kehitystä. 2000 tunnin käyttöikä laskettuna keskinopeudella 45 km/h antaa ajomääräksi 90 000 km.



Kuva 21. Mod II -moottorin rakennekuva [9, s. 7].

Mod II -moottori on V-asentoinen 4-sylinterinen, kaksitoiminen alfa-typin moottori, jonka rakenne on esitetty kuvassa 21. Kampikoneisto on toteutettu perinteisellä kampiakselilla ja kiertokanki on ristikappale mekanismilla, joka eliminoi männän sivuvoimat. Työkaasuna käytetään vetyä paineistettuna maksimissaan 150 bar:n paineeseen. Lämmittimen pintalämpötila on 820 °C. Kuvassa moottori on jaettu kolmeen alueeseen, joista ylimpänä on eristetty polttokammio, jonne ohjataan esilämmitetty tuloilma polttoainesuuttimen luo. Keskellä on moottorin kuuma osa, jonka pääosia ovat lämmitin ja sylintereiden laajentumistilat. Alimpana kuvassa on moottorin kylmä osa, johon kuuluu puristustila, jäähdytysneste kanavat, kampikoneisto ja voiteluöljy tila.



Kuva 22. Mod II -moottorin teho- ja hyötysuhdekäyrä pyörintänopeuden funktiona [9, s. 40].

Mod II-moottorin suorituskyky on esitetty kuvassa 19 teho- ja hyötysuhdekäyränä pyörintänopeuden funktiona. Moottorin maksimiteho 62,3 kW (83,5 hp) saavutetaan 4000 r/min, jolloin hyötysuhde on 28,2 %. Maksimivääntömomentti 212,2 Nm saavutetaan pyörintänopeudella 1000 r/min (ei ole luettavissa kuvaajasta). Maksimihyötysuhde 38,5 % saavutetaan pyörintänopeudella 1200 r/min, jolloin teho on 26,7 kW (35,8 hp). Huomionarvoista on hyvin laaja, hyvä hyötysuhdealue moottorin pyörintänopeusalueella; yli 30 % prosentin hyötysuhde saavutetaan vielä n. 3200 r/min.

Taulukko 2. Mod II- ja ottomoottorin suoritusarvojen vertailua.

	<b>Yhdistetty kulutus , benssiini (l / 100 km)</b>	<b>Auton massa (kg)</b>	<b>Kiihtyvyys 0–97 km/h (s)</b>
<b>Mod II</b>	5,7	1433,1	12,4
<b>Ottomoottori</b>	7,6	1387,8	13

Taulukkoon 2 on koottu suoritusarvoja otto- ja Mod II -moottorin välillä. Stirlingmoottorilla varustettuna auto ei ole painanut kuin 45,3 kg enemmän. Kiihtyvyys on ollut 0,6 s parempi johtuen stirlingmoottorin suuremmasta vääntömomentista ja tasaisemmasta vääntökäyrästä. Tässä alaluvussa kerrottu tieto on referoitu Nightingalen kirjoittamasta raportista ”Automotive Stirling Engine Mod II Design Report” [9] vuodelta 1986.

#### 4.2 Modernit moottorit

Nykyaikana stirlingmoottorien valmistajia on vain muutama. Näistä harvoista valmistajista jokainen on kehittänyt moottorinsa joko CHP- tai CSP-sovelluksiin toimimaan aurinkoenergialla tai erilaisilla bioenergiälähteillä. Ajoneuvosovelluksiin ei kehitetä moottoreita, joka pakottaa ottamaan tarkastelun kohteeksi tarjolla olevat moottorit. Hyvänä yhteisenä puolena on, että CHP- ja CSP-moottorisovellukset ovat suunniteltu generaattori käyttöön, joka helpottaa soveltuvuuden arviointia sarjahybridiin ajoneuvokäytössä. CHP ja CSP-sovelluksissa ei ole tärkeimpinä suunnittelu kriteereinä rakenteen kompakti koko sekä massa, mikä tekee moottoreista epäedullisia ajoneuvokäyttöä ajatellen. Valmistajat ilmoittavat teknisiä tietoja moottoreistaan hyvin vähän, mikä hankaloittaa suuresti moottoreiden arviointia.

Ruotsalainen Inresol AB valmistaa V2-6-nimistä gamma-tyypin moottoria CHP- ja CSP-sovelluksiin. Moottori on iskutilavuudeltaan 446 cm<sup>3</sup>, työkaasuna käytetään tyypeä ja lämmittimen maksimilämpötila on 1100 °C. Moottori tuottaa 5 kW jatkuvaa ja 10 kW hetkellistä sähkötehoa, ja hyötysuhde (polttoaineesta sähkötehoksi) on parhaimmillaan 34 %. Moottorin maksimipyörintänopeus on 1200 r/min ja nimellinen 1000 r/min. Moottorille luvataan 90 000 tunnin elinkaari ja huollon tarve 20 000 tunnin välein, jolloin moottorin tiivisteet ja laakerit uusitaan. Moottorissa on kuivalaakerit, minkä ansiosta huoltoväli on hyvin pitkä. [24.]





Kuva 23. V2-6-niminen gamma-tyypin moottori [22].

Moottorista kysyttiin lisätietoja valmistajalta sekä mielipidettä moottorin soveltuvuudesta sarjahybridikäyttöön. Moottorin painoksi valmistaja täsmänsi 40 kg antureitten kanssa ja 60 kg generaattorin kanssa. Näin ollen moottorin paino-tehosuhde on 12 kg/kW jatkuvan 5 kW:n sähkötehon tuoton aikana ja 6 kg/kW hetkellisen 10 kg/kW tuoton aikana. Valmistaja kertoi moottorista olevan mahdollista saada suuremmat litratehot tulevaisuudessa, kun käytetään eri työkaasua (vety tai helium) sekä nostetaan työkaasun painetta. Moottori on valmistajan mukaan tällä hetkellä kustannustehokas, mutta käyttämällä vetyä työkaasuna nousevat moottorin valmistuskustannukset kalliiksi, vaikka vedyn käyttäminen teknisesti onkin mahdollista. Valmistajan mukaan moottori sopisi sarjahybridikäyttöön, kun litratehot olisivat tarpeeksi korkeat. [22]

Toinen ruotsalainen yhtiö, Cleanergy AB, valmistaa CHP- ja CSP-sovelluksiin alfa-tyypin moottoreita, jotka käyttävät työkaasuna heliumia (CHP) ja vetyä (CSP). CHP-moottori tuottaa 2–9 kW sähkötehoa 25 %:n hyötysuhteella (polttoaineesta-sähkötehoksi). CSP-moottori tuottaa 11–13 kW sähkötehoa 25–30 % hyötysuhteella (polttoaineesta-sähkötehoksi). Molemmille moottoreille luvataan 200 000 tunnin elinkaari. Muita tietoja moottoreista ei ole ilmoitettu ja tiedusteluista huolimatta ei enempää informaatiota kerrottu. [20; 21].

Myös ruotsalainen, Ripasso Energy AB, valmistaa CSP-sovelluksiin stirlingmoottoria. Valmistaja mainostaa moottorilla olevan maailmanennätyksen aurinkoenergian muunnosta sähköverkkoon hyötysuhteella 32 %. Itse moottorin hyötysuhteen sanotaan olevan yli 40 %. Moottori tuottaa 30 kW sähköenergiaa pyörintänopeudella 2300 r/min. Työkaa-

sun maksimipaine on 200 bar ja lämmittimen maksimilämpötila 720 °C. Moottorille luvataan 200 000 tunnin elinkaari pitkillä huoltoväleillä. Enempää tietoja moottorista ei tiedustelusta huolimatta saatu. [25.]

Ruotsalaisten ja isobritannialaisten yhteisomistuksessa oleva United Sun Systems valmistaa CSP-sovellukseen V4-90-nimistä moottoria. Moottori tuottaa 25–45 kW riippuen moottorin kierrosnopeudesta. Hyötysuhteen luvataan olevan n. 32 % (polttoaineesta sähkötehoksi). Moottori painaa n. 100 kg, josta saadaan moottorille laskettua paino-tehosuhteeksi 2,22–4 kg/kW. Muita tietoja moottorista ei ole ilmoitettu, ja valmistaja ei vastannut tiedusteltaessa lisätietoja. [26.]

Israelilaisten ja yhdysvaltalaisien yhteisomistuksessa oleva Qnergy valmistaa QB-7500-nimistä moottoria CHP-sovelluksiin. Moottori on vapaamäntäinen käyttäen työkaasunaan heliumia. Moottori tuottaa 7,5 kW sähköenergiaa ja painaa 103 kg, josta saadaan paino-tehosuhteeksi 13,73 kg/kW. Moottorin eliniäksi luvataan yli 60 000 tuntia täysin huoltovapaasti. [27.]

## 5 Stirlingmoottori hybridikäytössä

Kuten luvussa 3 todettiin, on stirlingmoottoriärkevin sarjahybridikäytössä. Tällöin päästään eroon mekaanisen voimalinjan vaatimasta laajasta kierrosalueesta ja voidaan hyödyntää stirlingmoottoria parhaalla hyötysuhdealueella generaattorikäytössä. Kun stirlingmoottorin mahdollista sarjahybridikäyttöä lähdetään tarkastelemaan, onärkevin tehdä vertailu jo olemassa olevaan sarjahybridiajoneuvoon. Hyvä esimerkki modernista sarjahybridiajoneuvosta on GM:n valmistama Chevrolet Volt Yhdysvalloissa ja Opel Ampera Euroopassa. Tästä eteenpäin puhutaan vain Opel Amperasta.

### 5.1 Vertailuajoneuvo Opel Ampera

Opel Amperan moottorina on 4-sylinterinen vapaastihengittävä 1,4-litrainen bensiinimoottori, tuottaa 63 kW akselitehoa pyörintänopeudella 4800 r/min ja 130 Nm pyörintänopeudella 4250 r/min. Moottori on kytketty generaattoriin, joka tuottaa 54 kW sähkötehoa. [28] Moottori painaa n. 100 kg [29]. Generaattorin hyötysuhde saadaan laskettua siis kaavasta

$$\eta_{gen} = \frac{54 \text{ kW}}{63 \text{ kW}} = 0,857 = 85,7 \% \quad (1)$$

Ampera on varustettu sähkömoottorilla, jonka teho on 111 kW ja maksimivääntömomentti 370 Nm. Huippunopeus on 161 km/h ja kiihtyvyys 0–100 km/h on n. 9 sekuntia. Amperan ajopaino on 1732 kg sekä yhdistetty polttoaineen kulutus on  $1,6 \frac{L}{100 \text{ km}}$  ja CO<sub>2</sub>-päästöt 27 g/km. [30; 31].

Ampera ei ole aivan täysin sarjahybridi, vaan sen Voltec-niminen voimalinja mahdollistaa myös generaattorin käytön ajomoottorina. Generaattori saadaan kytkimen kautta yhdistettyä samalle planeettavaihteistolle sähkömoottorin kanssa, joka mahdollistaa suuremmat ajonopeudet, kun sähkömoottorin hyötysuhde romahtaa nopeuden n. 112 km/h kohdalla [32]. Amperan voimalinjaan voi tutustua tarkemmin SAE:n (Society of Automotive Engineers) teettämästä tutkimuksesta SAE 2012-01-1027 [33].

Työssä tarkastellaan teoreettista stirlinghybridiajoneuvoa, jonka maksimihuippunopeus on 120 km/h. Tästä näkökulmasta kun tarkastellaan Amperan suoritusarvoja, voidaan sanoa, että moottorilta vaadittava teho voi olla vähemmän kuin 63 kW.

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan stirlingmoottorin soveltuvuutta sarjahybridiin eri näkökulmista. Tarkastelun tueksi suoritetaan laskentaa saatavilla olevien stirlingmoottorien teknisten tietojen perusteella.

## 5.2 Energiankäyttö

Kuvitteellisessa tilanteessa Amperan bensiinimoottori korvataan stirlingmoottorilla. Tällöin hybridijärjestelmän muut komponentit pysyvät samana. Moottorin vaihto tarkoittaa generaattoria pyörittävän voimanlähteen muuttumista, jolloin energiankäytön muuttumista voidaan arvioida stirlingmoottoreista ilmoitettujen hyötysuhteiden avulla käänteisesti laskettuna. Laskennan tulosta voidaan pitää hyvinkin oikean suuntaisena, koska moottoreita pyritään käyttämään parhaalla hyötysuhde alueellaan jatkuvasti generaattori käytössä.

Amperan bensiinimoottorista ei ole ilmoitettu hyötysuhdetta, mutta modernin henkilöauto ottomoottorin hyvänä hyötysuhteena voidaan käyttää 35 %:a [7, s. 79; 34, s. 13] ja henkilöautodieselmoottorien 41 %:a [34, s.13]. Nämä ovat hetkellisesti saavutettavia parhaita hyötysuhteita, joilla sarjahybridikäytössä moottoreita pyritään käyttämään.

Stirlingmoottoreiden laskennalliset moottoritehot  $P_{mot}$  ja moottorien hyötysuhteet  $\eta_{mot}$  saadaan, kun käytetään aiemmin kaavalla 1 laskettua generaattorin hyötysuhdetta  $\eta_{gen}$  ja tiedetään moottoreista ilmoitetut sähkötehot  $P_e$  ja kokonaishyötysuhteet  $\eta_e$  generaattorin jälkeen. Polttomoottorin laskennallinen teho saadaan kaavasta

$$P_{mot} = \frac{P_e}{\eta_{gen}} = \frac{P_e}{0,857} \quad (2)$$

Polttomoottorin ja generaattorin kokonaishyötysuhde  $\eta_e$  muodostuu moottorin  $\eta_{mot}$  ja generaattorin  $\eta_{gen}$  tulosta, josta saadaan ratkaistua moottorin hyötysuhde  $\eta_{mot}$ :

$$\eta_e = \eta_{gen} * \eta_{mot} \rightarrow \eta_{mot} = \frac{\eta_e}{\eta_{gen}} \quad (3)$$

Bensiinimoottorin kokonaishyötysuhde  $\eta_e$  saadaan kaavasta 3 hyötysuhteiden tulona.

Bensiinille ilmoitetaan lämpöarvoksi  $H_B = 42,7 \frac{MJ}{kg}$  ja dieselille  $H_D = 42,5 \frac{MJ}{kg}$  [35, s. 280].

Lämpöarvojen avulla saadaan laskettua ominaiskulutukset, kun tiedetään moottoreiden hyötysuhteet. Bensiinin ja dieselin lämpöarvot täytyy muuttaa vielä laskentaan sopivaan muotoon:

$$H_B = \frac{42,7 \frac{MJ}{1000g}}{3,6} = 0,0118611111 \frac{kWh}{g} \quad (4)$$

$$H_D = \frac{42,5 \frac{MJ}{1000g}}{3,6} = 0,011805556 \frac{kWh}{g} \quad (5)$$

Polttoaineen ominaiskulutus  $b$  saadaan laskettua seuraavasta kaavasta:

$$b = \frac{1}{\eta_{mot} * H} \quad (6)$$

Alla on esitetty taulukko 3, jossa on laskennalliset moottoritehot ja hyötysuhteet niistä stirlingmoottoreista, joista oli ilmoitettu kokonaishyötysuhde. Taulukkoon on laskettu vastaavasti bensiini- ja dieselmoottoreista kokonaishyötysuhteet. Dieselmoottori on kuvitteellinen, tehoiltaan sama kuin Amperan bensiinimoottori. Kaksi oikeanpuoleisinta saraketta ovat laskennalliset ominaispolttoaineen kulutukset bensiinillä ja dieselillä. Taulukossa on vertailun vuoksi Mod II -moottorille lasketut arvot parhaalla hyötysuhteella. Vapaamäntäinen QB-7500 -moottori ei ole vertailussa mukana, koska valmistaja ei ilmoittanut moottorin hyötysuhdetta.

Taulukko 3. Laskennalliset hyötysuhteet. Tehot ja näitä vastaavat ominaiskulutukset esitetty sinisellä pohjalla.

<b>Moottori</b>	$\eta_{mot}$ (%)	$\eta_e$ (%)	$P_e$ (kW)	$P_{mot}$ (kW)	$b_{Bensiini}$ (g/kWh)	$b_{Diesel}$ (g/kWh)
V2-6	39,7	34	5	5,8	212,5	213,5
Gasbox 901	29,2	25	9	10,5	289,0	290,4
Sunbox 111	35,0	30	13	15,2	240,8	242,0
V4-90	37,3	32	25	29,2	225,8	226,9
Ripasso SPC	40	34,3	30	35,0	210,8	211,8
Bensiini	35	30,0	54	63	240,9	
Diesel	41	35,1	54	63		206,6
Mod II	38	32,6	22,8819	26,7	221,9	222,9

Taulukko osoittaa hyvin, että stirlingmoottori saavuttaa toimiessaan hyvällä hyötysuhteella edullisen ominaiskulutuksen. Modernin bensiinimoottorin ominaiskulutus on suurempi kuin V2-6, Ripasso SPC ja V4-90 -moottoreiden sekä samansuuruinen Sunboxin kanssa. Kuvitteellisella dieselmoottorilla on suurin hyötysuhde, minkä vuoksi myös pienin ominaiskulutus.

Stirlingmoottori ei tarvitse nykyisiä otto- ja dieselmoottoreita varten pitkälle jalostettuja polttoaineita, koska ulkoinen palaminen mahdollistaa käyttää vähemmän jalostettuja polttoaineita. Fossiilisen polttoaineen potentiaalisesta energiasisällöstä on nykyisellä polttoaineen jalostusasteella jäljellä n. 85 %, kun se tankataan autoon. Puuttuvasta 15 %:sta on hävinnyt raakaöljytuotantoon 4 %, kuljetuksiin 1 % ja jalostukseen 10 % [36, s. 27]. Mahdollisuus käyttää vähemmän jalostettua polttoainetta voisi laskea jalostamiseen tarvittavaa energian määrää n. 30 %, joka näkyisi kokonaisuudessa n. 3 %:n vähentymänä [37]. Kolmasosan energiansäästö jalostamisen energiankulutuksessa olisi hyvin tuntuva ja näkyisi kuluttajalle polttoaineen hinnassa.

Stirlingmoottorissa yksi polttoaineen kulutusta nostava tekijä on käynnistysvaihe. Moottori ei tuota tehoa ennen kuin riittävä lämpötila-ero on saavutettu. Käynnistysvaiheessa poltetaan siis polttoainetta, jonka energiasisältöä ei saada hyödynnettyä työksi. Mod II -moottorista on mitattu 125 g:n (benssiini) polttoaineenkulutus, ennen kuin moottorista on saatu tehoa [9, s. 38]. Hybridikäytössä ei päästä eroon käynnistämisen vaatimasta polttoaineenkulutuksesta, mutta palamisen loputtua on moottorissa yhä lämpötilaero, josta osalla saadaan ladattua akkuja generaattorin avulla. Näin ollen saadaan kompensoitua käynnistyksessä syntynyttä polttoaineenkulutusta. Hybridikäytössä moottorin käyttö tulisi suunnitella siten, että pyritään mahdollisimman vähäisiin käynnistykseen ja pitkiin ajo- sykleihin, joilla minimoitaisiin esitettyä haitallista ominaisuutta.

### 5.3 Päästöt

Luvun 2 lopussa tarkasteltiin vuonna 1972 mitattuja haitallisia päästöjä Ford Torinosta verrattuna Euro 6 -päästönormin vaatimuksiin. Voidaan todeta stirlingmoottorin olevan hyvin matalapäästöinen, koska taulukossa 1 esitetyt arvot on mitattu ilman katalysaattoria tai muitakaan saasteita vähentäviä laitteistoja, joita moderneissa otto- ja dieselmoot-

toireissa käytetään. NO<sub>x</sub>-päästöt muodostuvat korkeissa lämpötiloissa, joita stirlingmoottorissa esiintyy, mutta nämäkin päästöt ovat hyvin maltilliset ja niitä saadaan varmasti vähennettyä palotapahtuman optimoinnilla ja pakokaasujen takaisinkierrätyksellä.

Nykyaikainen jatkuvalla palotapahtumalla toimiva laite on Oilon Oy:n valmistama, diesel-polttoaineella toimiva Junior Eco -öljypoltin, joka tuottaa n. 1700 g NO<sub>x</sub>-päästöjä vuodessa [38]. Poltin on suunniteltu omakotitalokäyttöön. Jos poltinta käytettäisiin keskimäärin 5 h/vrk, olisi vuotuinen käyttö yhteensä 1810 tuntia. Tällöin öljypolttimen NO<sub>x</sub>-päästöt olisivat  $\frac{1700g}{1810h} = 0,94 \frac{g}{h}$ . Euro 6 -päästönormissa diesel NO<sub>x</sub>-päästöjen yläraja on  $0,08 \frac{g}{km}$  [19]. Jos ajoneuvolla ajettaisiin 20 000 km vuodessa, olisivat sen päästöt  $20000km * 0,08 \frac{g}{km} = 1600 g$ . Keskinopeudella 45 km/h olisi ajo-aika  $\frac{20000km}{45 \frac{km}{h}} = 444h$ . Tällöin ajoneuvon päästöt tunnissa olisivat  $\frac{1600g}{444h} = 3,6 \frac{g}{h}$ . Esimerkki täysin kuvitteellinen, mutta antaa hyvän kuvan jatkuvan palotapahtuman vähäpäästöisyydestä.r/

Hiilidioksidipäästöjen syntyminen on suoraan verrannollinen polttoaineen kulutukseen, joten mitä vähemmän moottori kuluttaa polttoainetta, sen vähemmän syntyy hiilidioksidipäästöjä. Kuten taulukosta 3 nähdään, on stirlingmoottorin polttoaineenkulutus hiukan dieselmoottoria suurempi, mutta bensiinimoottoria parempi karkeasti yleistäen. Stirlingmoottorin eduksi lukeutuu kuitenkin jalostusvaiheessa saatava energiansäästö, joka pienentää suoraan 3 % poltetun polttoaineliträn hiilijalanjälkeä.

#### 5.4 Paino-tehosuhde

Stirlingmoottoreita pidetään yleisesti hyvin raskaina ja paino-tehosuhteeltaan huonoina moottoreina. Autoteknillinen taskukirja ilmoittaa stirlingmoottoreiden paino-tehosuhteeksi 7–10 kg/kW [35, s. 453]. Stirlingmoottoreista on saatu rakennettua paino-tehosuhteeltaan samoja otto- ja dieselmoottoreiden kanssa, mutta hinta on ollut tällöin 2–10-kertainen [6, s. 102]. Alla esitetyssä taulukossa 4 on laskettu paino-tehosuhteet niistä moderneista stirlingmoottoreista, joista tiedot saatiin. Teho on suoraan sähkötehoa, ellei toisin mainita. Vertailuarvoina ovat Amperan bensiinimoottori, kirjallisuusarvo henkilöauton otto- ja dieselmoottorille sekä Mod II -moottorin paino-tehosuhde kuvasta 20.

Taulukko 4. Stirlingmoottoreiden paino-tehosuhteita verrattuna otto- ja dieselmoottoreihin.

<b>Moottori</b>	<b>Paino (kg)</b>	<b>P<sub>e</sub> (kW)</b>	<b>Paino/P<sub>e min</sub> (kg/kW)</b>	<b>Paino/P<sub>e max</sub> (kg/kW)</b>
V2-6	60	5–10	12	6
QB-7500	103	7,5	13,73	13,73
V4-90	100	25–45	4	2,22
Ampera	100	54	1,85	1,85
Otto			3*	1*
Diesel			4*	2*
Mod II			3,35**	3,35**

\* Akseliteho, ahdettu [33, s.453.].

\*\* Akseliteho

Taulukosta huomaa selvästi QB-7500-vapaamäntäisenmoottorin ja V2-6-moottorin surkean paino-tehosuhteen. On huomattava, että V2-6-moottori on gamma-tyyppinen ja sen paino-tehosuhde paranee kuitenkin huomattavasti tehon kaksinkertaistuessa. QB-7500-moottorin arvo selkeästi osoittaa, että vapaamäntäinen stirlingmoottori ei ole mahdollinen ajoneuvosovelluksiin. V4-90-stirlingmoottorin paino-tehosuhde on hyvinkin kilpailukykyinen verrattuna otto- ja dieselmoottoreiden kirjallisuusarvoihin. Taulukon arvoja sekoittaa kuitenkin hyvin suuri hajonta arvojen välillä, minkä johdosta ei ole mahdollista saada selvää kuvaa modernien moottoreiden paino-tehosuhteesta. Kolme valmistajaa ei ilmoittanut tiedusteluista huolimatta moottorinsa painoa, minkä johdosta stirlingmoottoreita on vertailussa vain kolme.

Aiemmin luvussa 2 todettiin stirlingmoottorin vaativan noin kaksi kertaa suuremman jäähdytysjärjestelmän kuin tehoiltaa samanlainen otto- tai dieselmoottori. Tällainen jäähdytysjärjestelmä vaatii tilavuudeltaan noin kaksinkertaisen määrän jäähdytysnestettä, sekä itse jäähdyttäjien koko täytyy olla kaksinkertainen. Tämä tarkoittaa jäähdytyskomponenttien karkeasti painavan myös tuplasti sen verran kuin otto- tai dieselmoottorissa. Lisäksi suurempi jäähdytysjärjestelmä vaatii ajoneuvosta noin kaksinkertaisen tilan. Tämä on suuri haaste henkilöautohybridiä ajatellen, jossa tilaa on muutoinkin hyvin vähän akuston vaatiman tilan vuoksi.



## 5.5 Suorituskyky

Kuvitteelliselle stirlinghybridille asetettiin vaatimus suurimmaksi ajonopeudeksi 120 km/h. Tämä tarkoittaa käytännössä, että stirlingmoottorin on kyettävä tuottamaan sellainen teho, joka vaaditaan jatkuvasti pyörällä tasaisessa 120 km/h nopeudessa, niin että akustossa ei ole varausta jäljellä. Pyörällä vaadittava teho  $P_W$  saadaan laskettua yhtälöstä

$$P_W = F_W * v, \quad (7)$$

jossa  $F_W$  on ajoneuvon vastusvoimat ja  $v$  on ajonopeus.  $F_W$  koostuu pääasiassa ilmanvastusvoimasta  $F_i$ , vierinvastusvoimasta  $F_r$  ja nousuvastusvoimasta  $F_n$ . Ajoneuvolla ajetaan tasaisella, jolloin nousuvastusvoima  $F_n$  voidaan jättää huomioimatta. Vierinvastusvoima  $F_r$  saadaan laskettua vierinvastuskertoimen  $f$  ja pyöränkuormien  $G_r$  tulona:

$$F_r = f * G_r \quad (8)$$

Vierinvastuskertoimen  $f$  arvona voidaan käyttää taulukkoarvoa 0,013 asfalttipinnalla [33, s. 378]. Pyöränkuormat  $G_r$  muodostuvat ajoneuvon massan  $m$  ja putoamiskiihtyvyyden  $g$  tulona.

Opel Amperan massa ilman bensiinimoottoria on 1632 kg. Arvioidaan, että moderni ajoneuvokäyttöön rakennettu stirlingmoottori Amperaan painaisi 150 kg ja suurempi jäähdytysjärjestelmä toisi 30 kg lisäpainoa. Tällöin ajoneuvon massaksi  $m$  saadaan 1812 kg. Vierintävastukseksi  $F_r$  kaavan 8 mukaan saadaan

$$F_r = 0,013 * \left(1812 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \approx 231,1 \text{ N} \quad (9)$$

Ilmanvastuskertoimelle  $F_i$  pätee kaava

$$F_i = \frac{1}{2} * \rho * c_W * A * v^2 \quad (10)$$

$\rho$  on ilman tiheys  $1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , kun 20 °C ja 1 bar [39]

$c_W$  on ilmanvastuskerroin, Amperalla 0,28 [40]

$A$  on otsapinta-ala, Amperalla 2,2018  $m^2$  [40].

Ilmanvastusvoimaksi nopeudella 120 km/h saadaan

$$F_i = \frac{1}{2} * 1,204 \frac{kg}{m^3} * 0,28 * 2,2018m^2 * \left(\frac{120m}{3,6s}\right)^2 \approx 412,4 N \quad (11)$$

Kaavasta 7 saadaan nyt laskettua pyörällä vaadittava teho 120 km/h nopeudessa:

$$P_W = (231,1 N + 412,4N) * \frac{120m}{3,6s^2} = 21450W = 21,45kW \quad (12)$$

Jotta pyörille saadaan välitettyä teho  $P_W$ , täytyy strilingmoottorin tuottaa teho  $P_{stir}$ , joka muunnetaan mekaanisesta akselitehosta generaattorin läpi sähkötehoksi  $P_e$  hyötysuhteella  $\eta_{gen}$ . Sähköteho  $P_e$  muunnetaan sähkömoottorille sopivaan muotoon ja sähkömoottori tuottaa akselitehon  $P_{em}$  hyötysuhteella  $\eta_{em}$ . Sähkömoottorin tuottama akseliteho  $P_{em}$  ohjataan vaihteiston läpi, joka tuottaa vaaditun pyörätehon  $P_W$  vaihteiston hyötysuhteella  $\eta_g$ . Sähkötehon muuntamisen ja sähkömoottorin yhteishyötysuhteeksi  $\eta_{em}$  voidaan olettaa n. 90 % [41] ja vaihteiston hyötysuhteeksi  $\eta_g$  n. 92 % [35, s. 382]. Moottorilta vaadituksi akselitehoksi  $P_{stir}$  saadaan siis

$$P_{stir} = \frac{P_W}{\eta_g * \eta_{em} * \eta_{gen}} = \frac{21,45kW}{0,92 * 0,9 * 0,857} \approx 30,23 kW \quad (12)$$

Moottorin tuottama sähköteho  $P_e$  generaattorin jälkeen on

$$P_e = P_{stir} * \eta_{gen} = 30,23 * 0,857 \approx 25,91 kW \quad (13)$$

Amperassa on litiumionityypin akusto, joka painaa 170 kg [42]. Akuston nimellisjännite on 355,2 V, ja se kykenee varamaan 16,5 kWh:n energiamäärän ja antamaan maksimissaan 240,4 kW:n hetkellisen tehon [43]. Käytännössä tuota tehoa ei voida hyödyntää järkevästi suurien häviöiden ja johtimien asettamien rajoitteiden takia. Akuston ominaisuudet osoittavat kuitenkin, että 111 kW:n sähkömoottorin maksimaalinen kuormittaminen on mahdollista hetkellisesti yksinään akuston energialla. Näin Ampera käyttäytyykin myös bensiinimoottorin kanssa, kunnes sähkömoottorin hyötysuhde romahtaa n. 112

km/h -nopeudessa ja bensiinimoottori osallistuu ajoon suoraan planeettavaihteiston välityksellä. Tämä tarkoittaa kiihtyvyyssarvojen huonontuvan vain lisääntyneen painon osalta.

Näin ollen arvio stirlinghybridin kiihtyvyydestä 0–100 km/h saadaan verrantona Amperan suoritusarvoon. Ajoneuvojen massojen ja kiihdytyksiin kuluviin aikojen suhteet ovat suoraan verrannollisia, kun ainoa ero ajoneuvojen välillä on massa. Näin ollen saadaan stirlinghybridin kiihtyvyys ratkaistua ristiin kertomalla:

$$\frac{1732kg}{9s} = \frac{1812kg}{t} \rightarrow 1732kg * t = 16308kgs \rightarrow t \approx 9,42s \quad (14)$$

Stirlinghybridi kykenee siis täysin riittäviin suoritusarvoihin, kun akustossa on varausta jäljellä. Kun akuston varaus laskee niin alas, ettei sieltä voida ottaa energiaa ajamiseen, tapahtuu ajaminen täysin moottorin tuottamalla energialla. Tällöin stirlinghybridin suorituskyky on lisääntyneen painon ja moottoreiden tehoeron verran surkeampi Amperaan verrattuna. Moottoreiden tuottaman sähkötehon ero on  $54kW - 25,91kW = 28,09 kW$ , joka tarkoittaa käytettävissä olevan tehon pelkällä moottorilla ajettaessa olevan 28,09 kW vähemmän. Suorituskykyä normaaleissa ajotilanteissa on vaikea arvioida ilman ajo-tilapiirrosta, mutta todennäköisesti tehovaje tulee näkymään vasta matkanopeuksissa yli 80 km/h jälkeen, jolloin ilmanvastuksen voittamiseen tarvittava teho kasvaa nopeasti.

## 5.6 Muita vertailukohtia

Stirlingmoottorin paino-tehosuhteen kg/kW ollessa pieni, on moottorin hinta €/kW hyvin korkea. Moottorinvalmistajat eivät ilmoittaneet moottoreidensa hintoja, minkä johdosta on hyvin vaikea arvioida modernien moottoreiden hintoja. V2-6-moottorin hinnaksi voidaan arvioida n. 5000 € [44], josta saadaan moottorin hinnaksi 500–1000 €/kW. Jos moottorin teho nostettaisiin esim. 20 kW:iin käyttämällä vetyä työkaasuna, saattaisi moottorin hinta nousta kaksi- tai kolminkertaiseksi. Moottoreiden hinnat varmasti laskisivat, jos tuotantomäärät olisivat suurempia.

Katalysaattoria ja hiukkassuodatinta ei tarvita, mikä osaltaan laskee stirlingmoottorin valmistuskustannuksia verrattuna otto- ja dieselmoottoreihin. Lisäksi ei tarvita korkeapaine-ruiskutuslaitteistoja polttoaineensyöttöön, mutta kuumankestomateriaaleja vaaditaan

lämmittimessä ja polttokammiossa. Jos käytetään vetyä työkaasuna, nousevat moottorin valmistuskustannukset reilusti johtuen tiivistysratkaisun hinnasta.

Suuri ongelma mietittäessä stirlingmoottorin mahdollista hybridikäyttöä, on sopivan moottorin puuttuminen markkinoilta. Moottorinvalmistajia on vähän ja niiden valmistat moottorit on suunniteltu CHP- ja CSP-sovelluksiin. Ajoneuvokäyttöön täytyisi suunnitella kompaktinkokoinen moottori nestemäisen polttoaineen polttamiseen suunnitellulla palokammioilla.

Stirlingmoottori kykenee käyttämään mitä tahansa polttoainetta lämpölähteenään. Ajoneuvokäytössä nestemäinen polttoaine on erittäin hyvä vaihtoehto korkean energiasisältönsä ja logistiikan vaivattomuuden vuoksi. Käytännössä siis mikä tahansa polttoaine kelpaa, kun polttokammio on suunniteltu kyseessä olevan polttoaineen polttamiseen.

Kylmissä olosuhteissa ei stirlingmoottori vaatisi erillisiä moottorin lisälämmittämiä, joita otto- ja dieselmoottorin kanssa käytetään. Esilämmitys tapahtuisi moottorin normaalin palamisen yhteydessä ennen käynnistystä. Lisäksi kylmässä ilmastossa moottorin hyötysuhde paranee lämpötilaeron kasvaessa, koska jäähdytintä toimii matalammassa lämpötilassa.

Modernien stirlingmoottoreiden huoltovälit ovat hyvin pitkiä. On muistettava kuitenkin moottoreiden olevan kevyemmällä kuormituksella CHP- ja CSP-sovelluksissa kuin ajoneuvokäytössä, mikä osaltaan saattaa selittää pitkät huoltovälit. Jos ajoneuvokäyttöön rakennetulla suuren tehotehden omaavalla stirlingmoottorilla päästäisiin vaikkapa puoleen V2-6-moottorin 20 000 tunnin huoltovälistä, eivät moottorin kalliimmat valmistuskustannukset haittaisi. Mielenkiintoinen näkökulma on myös se, kannattaako rakentaa pienemmän tehotehden moottoreita, joiden valmistuskustannukset ovat pienemmät ja painavat enemmän, jos saavutetaan hyvin pitkät huoltovälit.

## 6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää stirlingmoottorin nykyinen kehityksen tila ja moottorin soveltuvuus sähköisen voimalinjan kanssa hybridikäyttöön henkilöautossa. Työssä perehdyttiin aluksi kattavasti stirlingmoottorin historiaan, toimintaan, erilaisiin moottorityyppeihin, moottorin komponentteihin ja käsiteltiin stirlingmoottorin yleisiä ominaisuuksia. Tarkoitus oli luoda vahva tietopohja, jotta stirlingmoottorin vertailu otto- ja dieselmoottorin välillä sähköiseen voimalinjaan yhdistettynä olisi mahdollista.

Työ esitteli kolmannessa luvussa lyhyesti sähköisen voimalinjan ja ajoneuvojen rakenteelliset hybridivaihtoehdot. Kolmannessa luvussa todettiin sarjahybridin olevan paras vaihtoehto stirlingmoottorin kanssa, koska tämä rakenne eliminoi tarpeen moottorin laajalle pyörintänopeus alueelle, joka taas poistaa tarpeen monimutkaisille pyörintänopeuden säätölaitteistoille. Stirlingmoottori soveltuu siis hybridikäyttöön sähköisen voimalinjan kanssa paremmin kuin yksinään mekaanisen voimalinjan kanssa.

Neljäs luku esitteli edistyneimmän ajoneuvoon kehitetyn stirlingmoottorin, joka tosin oli kytketty mekaaniseen voimalinjaan. Tämä Mod II -moottori kuitenkin osoittaa stirlingmoottorin kyenneen haastamaan jo vuonna 1986 ottomoottorin. Luvun loppuosa käsitteli moderneja stirlingmoottoreita, ja siinä todettiin valmistuksen keskittyneen täysin CHP- ja CSP-sovelluksiin. Moottorivalmistajat ilmoittavat moottoreistaan hyvin niukasti tietoa, ja suurin osa jätti vastaamatta lisätiedusteluihin, mikä vääristi ja vaikeutti tulosten saamista seuraavassa luvussa.

Työn päätavoitteeseen vastattiin luvussa 5. Stirlingmoottoria verrattiin GM:n valmistamaan sarjahybridiin, Opel Amperaan. Stirlingmoottorin todetaan olevan täysin kilpailukykyinen energiankäytön kannalta verrattuna otto- ja dieselmoottoriin. Stirlingmoottorin ulkoinen palotapahtuma on luonnostaan hyvin vähäpäästöinen. Ulkoinen palotapahtuma mahdollistaa vähemmän jalostetun polttoaineen käytön, mikä laskee polttoaineen polttamisesta syntyviä kokonaispäästöjä. Stirlingmoottoreiden paino-tehosuhteen nykytilasta ei voitu muodostaa kunnollista kuvaa, koska moottoreista ei näitä kriittisiä tietoja saatu. Kuvitteellisen ajoneuvon tehontarve laskettiin ja arvioitiin ajoneuvon suorituskykyä, joka osoittautui täysin kelvolliseksi.

Stirlingmoottorin kehityksen nykytilan selvitys onnistui hyvin. Ajoneuvomoottoreiden, jotka vaativat suuren tehotehityksensä vuoksi vedyn työkaasuksi, kehitys oli pysähtynyt

pääasiassa moottorin valmistuskustannuksien ja vedyn tiivistysongelmien takia. Työssä saatiin selville, että vedyn tiivistäminen on nykytekniikalla täysin mahdollista mutta kallista. Koska tiivistäminen on kallista, ovat myös valmistuskustannukset korkeat. Kustannukset varmasti laskisivat, jos moottoreita valmistettaisiin samanlaisessa mittakaavassa kuin otto- ja dieselmoottoreita. Uuden työkaasun kehittäminen vedyn rinnalle saattaisi myös ratkaista kustannusongelman.

Modernien otto- ja dieselmoottoreiden suunnittelua eniten ohjaavat tekijät ovat päästöt ja polttoaineen kulutus. Työ osoittaa stirlingmoottorin olevan aivan ylivoimainen päästöjen suhteen ja täysin kilpailukykyinen polttoaineen kulutuksen suhteen verrattaessa otto- ja dieselmoottoreihin. Stirlingmoottoreiden ongelmia ovat suurempi paino-tehosuhde ja hinta-teho suhde. Paino-tehosuhteeltaan kilpailukykyisiä moottoreita saadaan varmasti rakennettua, mutta todennäköisesti hinta-tehosuhteen nousun kustannuksella. Tulevaisuutta ajatellen stirlingmoottori on järkevä vaihtoehto nimenomaan matalapäästöisyytensä ansiosta.

Suurin ongelma mietittäessä mahdollisen stirlinghybridiprototyypin valmistusta, on sopivan moottorin puuttuminen markkinoilta. Stirlinghybridin prototyypin rakentaminen vaatisi aluksi moottorinkehitysprojektin, jossa suunniteltaisiin aivan uusi moottori tai modifioitaisiin jonkun moottorinvalmistajan valmiista tuotteesta ajoneuvokäyttöön sopiva moottori. Oma näkemykseni ajoneuvostirlingmoottorista on kaksitoiminen alfa-tyyppin moottori, joka saadaan kaksitoimisuutensa ansiosta rakennettua kompaktinkokoiseksi ja mahdollistaa hyvän paino-tehosuhteen sekä vetyä tai heliumia työkaasuna käytettäessä suuren tehotiheyden.

Henkilökohtaisesti koen saavuttaneeni työlle asetetun tavoitteen. Tulokset ovat suuruusluokiltaan oikeita ja arviot perustuvat kattavaan kirjallisuusselvitykseen stirlingmoottoreista. Asioita on pyritty perustelemaan kirjallisuuteen tukeutuen mahdollisimman paljon. Työn tekemistä eniten vaikeutti teknistentietojen puute moderneista stirlingmoottoreista sekä näiden tietojen kertomatta jättäminen niitä valmistajilta tiedusteltaessa.

## Lähteet

- 1 Directive 2014/94/EU of the European parliament and of the Council. 2014. Euroopan parlamentti.
- 2 Mikkonen, Seppo. R&D DI, Neste Oyj, Porvoo. Keskustelu. 2.4.2015.
- 3 Mcauley J.W. 2003. Global Sustainability and Key Needs in Future Automotive Design. *Environmental science & technology*, vol. 37, no. 23, pages 5414–5416. Saatavissa: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es030521x>>.
- 4 Walker.G. 1980. *Stirling Engines*. Oxford: Clarendon press.
- 5 De Vries Marc J. 2005. *80 Years of Research at the Philips Natuurkundig Laboratorium 1919–1994*. Amsterdam: Pallas Publications.
- 6 Walker, G., Reader, G., Fauvel, O. R. & Bingham, E. R. 1994. *The Stirling Alternative - Power System, Refrigerants and Heat Pumps*. London: Gordon and Breach Science Publishers.
- 7 Ehsani, Mehrdad, Gao, Yimin & Emadi, Ali. 2010. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory and Design*. Second edition. Florida, USA: CRC Press.
- 8 Thombare D.G. & Verma S.K. 2008. Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 12, Issue 1, s. 1–38. Saatavissa: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106000906>>.
- 9 Nightingale, Noel. 1986. *Automotive Stirling Engine Mod II Design Report*. Verkkodokumentti. NASA. <<http://mechanicalengineering.net/publications/automotive-stirling-engine.pdf>>. Luettu 15.4.2015.
- 10 *Stirling Engines - Mechanical Configurations*. 2012. Verkkodokumentti. Ohio University. <<http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>>. Luettu 14.4.2015.
- 11 Vineeth, C. S. 2012. *Stirling Engines: A Beginners Guide*. Verkkodokumentti. <[https://books.google.fi/books?id=zTdzKxQaqNcC&printsec=frontcover&dq=stirling&hl=fi&sa=X&ei=NgktVdDyCsGwsAGn\\_YHYDA&redir\\_esc=y%20-%20v=onepage&q=stirling&f=false#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=zTdzKxQaqNcC&printsec=frontcover&dq=stirling&hl=fi&sa=X&ei=NgktVdDyCsGwsAGn_YHYDA&redir_esc=y%20-%20v=onepage&q=stirling&f=false#v=onepage&q&f=false)>. Luettu 14.4.2015.
- 12 *The Stirling Engine*. 2005. Verkkodokumentti. Woodbank Communications Ltd. <[http://www.mpoweruk.com/stirling\\_engine.htm](http://www.mpoweruk.com/stirling_engine.htm)>. Luettu 15.4.2015.

- 13 Gamma Type Stirling Engines. 2012. Verkkodokumentti. Ohio University. <<http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html>>. Luettu 14.4.2015.
- 14 Kwankaomeng, Sutapat, Slipsakoolsook, Banterng & Savangvong, Pongnarin. 2014. Investigation on Stability and Performance of a Free-piston Stirling Engine. Energy Procedia, Volume 52, s. 598-609. Saatavissa: < [http://ac.els-cdn.com/S1876610214009771/1-s2.0-S1876610214009771-main.pdf?\\_tid=408b573e-e4d8-11e4-a284-00000aacb35e&acdnat=1429257997\\_370c0b4b19d5b84f05424a9cc020cd95](http://ac.els-cdn.com/S1876610214009771/1-s2.0-S1876610214009771-main.pdf?_tid=408b573e-e4d8-11e4-a284-00000aacb35e&acdnat=1429257997_370c0b4b19d5b84f05424a9cc020cd95)>.
- 15 Quasiturbine Stirling and Short Steam Circuit Hot Air Engine. Verkkodokumentti. Quasiturbine Agence. < <http://quasiturbine.promci.qc.ca/ETypeStirling.htm>>. Luettu 17.4.2015.
- 16 Neal, Bob. 1934. Verkkodokumentti. Compressor Unit, Yhdysvaltain patentti Nro. 2,030,759. <<http://pdfpiw.uspto.gov/.piw?docid=02030759&PageNum=2&ID-Key=F098623B2879&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1%2526Sect2=HI-TOFF%2526p=1%2526u=/netahtml/PTO/search-bool.html%2526r=1%2526f=G%2526l=50%2526d=PALL%2526S1=2030759.PN.%2526OS=PN/2030759%2526RS=PN/2030759>>. Luettu 17.4.2015.
- 17 Nimimerkki Togo. 2005. Verkkodokumentti. Wikimedia Commons. <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BetaStirlingTG4web.jpg>>. Luettu 17.4.2015.
- 18 Donald, Isaac, Vassallo, Alphonse & Steele, Ronald. 2003. Verkkodokumentti. Yhdysvaltain patentti Nro. US20030046932. < <http://pdfaiw.uspto.gov/.aiw?docid=20030046932&PageNum=9&IDKey=B65FD215DA04&HomeUrl=http://appft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1%2526Sect2=HI-TOFF%2526d=PG01%2526p=1%2526u=/netahtml/PTO/srch-num.html%2526r=1%2526f=G%2526l=50%2526s1=20030046932.PGNR.%2526OS=%2526RS=>>>. Luettu 17.4.2015.
- 19 Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council. 2007. Euroopan Parlamentti.
- 20 Gasbox for Biogas. 2015. Verkkodokumentti. Cleanergy AB. <[http://cleanergy.com/wp-content/uploads/2014/06/cleanergy\\_gasbox\\_biogas\\_lowres.pdf](http://cleanergy.com/wp-content/uploads/2014/06/cleanergy_gasbox_biogas_lowres.pdf)>. Luettu 26.4.2015
- 21 Sunbox for Solar Parks. 2015. Verkkodokumentti. Cleanergy AB. <[http://cleanergy.com/wp-content/uploads/2014/06/cleanergy\\_sunbox\\_lowres.pdf](http://cleanergy.com/wp-content/uploads/2014/06/cleanergy_sunbox_lowres.pdf)>. Luettu 26.4.2015
- 22 Larsson-Mastonstråle, Stefan. Teknologijahtaja, Inresol AB. Sähköpostikeskustelu. 4.5.2015.



- 23 Halderman, James D. & Martin, Tony. 2011. Hybrid and Alternative Fuel Vehicles. Pearson Education Inc., New Jersey, USA.
- 24 Inresol Stirling Engine Data Catalogue. 2015. Verkkodokumentti. Inresol AB. <[http://www.inresol.se/pdf/Inresol\\_Data\\_Sheet\\_Catalogue.pdf](http://www.inresol.se/pdf/Inresol_Data_Sheet_Catalogue.pdf)>. Luettu 4.5.2015.
- 25 Ripasso CSP. Verkkodokumentti. Ripasso Energy AB. <<http://www.ripassoenergy.com/our-technology/>>. Luettu 5.5.2015.
- 26 Products & Services. Verkkodokumentti. United Sun Systems Int. Ltd. <<http://www.unitedsunsystems.com/products-and-services/>>. Luettu 5.5.2015.
- 27 QB series engine spec sheet. Verkkodokumentti. Qnergy. <<http://www.qnergy.com/sites/Qnergy/UserContent/files/QB%20Engines%20Data%20Sheet%20-%20updated.pdf>>. Luettu 15.5.2015.
- 28 Matthe, Roland. 2012. Verkkodokumentti. Opel Ampera - Extended-Range Electric Vehicle Concept with Future. Verkkodokumentti. <[http://www.fh-zwickau.de/fileadmin/ugroups/ftz/Konferenzen/Ami\\_Kongress\\_2012/Matthe\\_AMI\\_Kongress\\_2012.pdf](http://www.fh-zwickau.de/fileadmin/ugroups/ftz/Konferenzen/Ami_Kongress_2012/Matthe_AMI_Kongress_2012.pdf)>. Luettu 6.5.2015.
- 29 Niemi, Petri. Asiakaspalvelija, General Motors Finland Oy. Sähköpostikeskustelu. 8.5.2015.
- 30 Opel Ampera: First Electric Vehicle to Go Anywhere Anytime. 2011. Verkkodokumentti. Opel Europe. <[http://media.opel.com/media/intl/en/opel/news/detail.html/content/Pages/presskits/intl/en/2011/Opel/06\\_29\\_opel\\_ampera\\_2011.html](http://media.opel.com/media/intl/en/opel/news/detail.html/content/Pages/presskits/intl/en/2011/Opel/06_29_opel_ampera_2011.html)>. Luettu 6.5.2015.
- 31 Teho, suorituskyky, kulutus. 2015. Verkkodokumentti. Opel Suomi. <<http://www.opel.fi/vehicles/opel-valikoima/autot/ampera/specifications/engines-transmissions.html>>. Luettu 6.5.2015.
- 32 Markus, Frank. 2010. Verkkodokumentti. Unbolting the Chevy Volt to See How it Ticks. MotorTrend. <[http://www.motortrend.com/features/editorial/1010\\_unbolting\\_the\\_chevy\\_volt\\_to\\_see\\_how\\_it\\_ticks/](http://www.motortrend.com/features/editorial/1010_unbolting_the_chevy_volt_to_see_how_it_ticks/)>. Luettu 15.5.2015.
- 33 Kim, Namdoo, Kwon, Jason & Rousseau, Aymeric. 2012. Comparison of Powertrain Configuration Options for Plug-in HEVs from a Fuel Economy Perspective. Society of Automotive Engineers. Saatavissa: <<http://www.autonomie.net/docs/6%20-%20Papers/powertrain/SAE%202012-01-1027.pdf>>.
- 34 Tschöke & Heinze. Einige Unkonventionelle Betrachtungen zum Kraftstoffverbrauch von PKW. Magdeburger Wissenschaftsjournal 1-2/2001. Verkkodokumentti. <<http://www.uni-magdeburg.de/MWJ/MWJ2001/tschoeke.pdf>>. Luettu 7.5.2015.

- 35 Autoteknillinen taskukirja 6. painos. 2002. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy.
- 36 Europa White Paper on Fuelling EU Transport. 2011. Europa. Verkkodokumentti. <[https://www.fuelseurope.eu/uploads/Modules/Resources/europa-white-paper\\_2011\\_lowres\\_corr\\_secured\\_20042011-2011-01251-01-e-2.pdf](https://www.fuelseurope.eu/uploads/Modules/Resources/europa-white-paper_2011_lowres_corr_secured_20042011-2011-01251-01-e-2.pdf)>. Luettu 5.5.2015.
- 37 Mikkonen, Seppo. R&D DI, Neste Oyj. Sähköpostikeskustelu. 5.5.2015.
- 38 Öljypolttimet. Verkkodokumentti. Rakentaja.fi. <<http://www.rakentaja.fi/indexfr.aspx?s=/kuluttaja/oilon/oilon1.htm>>. Luettu 8.5.2015.
- 39 Air – Density and Specific Weight. Verkkodokumentti. The Engineering Toolbox. <[http://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d\\_600.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html)>. Luettu 13.5.2015.
- 40 Sherman, Don. 2011. Drag Queens: Aerodynamics Compared. Verkkodokumentti. CarandDriver.com. <<http://www.caranddriver.com/features/drag-queens-aerodynamics-compared-comparison-test-third-place-chevrolet-volt-page-4>>. Luettu 14.5.2015.
- 41 Eskelinen, Ville. Projektipäällikkö, Metropolia ammattikorkeakoulu. Sähköpostikeskustelu. 27.4.2015.
- 42 DeMeiss, Rick. 2012. Verkkodokumentti. Teardown Report: Chevy Volt's electronic secrets. <[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1279627](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279627)>. Luettu 15.5.2015.
- 43 2013 Chevrolet Volt - VIN 3929 - Advanced Vehicle Testing - Beginning of The Test Battery Testing Results. 2012. Verkkodokumentti. U.S Department of Energy. <[https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/pdfs/phev/battery\\_volt\\_3929.pdf](https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/pdfs/phev/battery_volt_3929.pdf)>. Luettu 15.5.2015.
- 44 Running Cost & Pay Off Time Comparisons of 3 alternative Products. 2015. Verkkodokumentti. Inresol AB. <<http://www.inresol.se/pdf/3%20Product%20Payback%20Comparisons.pdf>>. Luettu 23.5.2015.

