

POLTTOMOOTTORIEN KEHITTYMINEN ENSIMMÄISEN MAAILMANSODAN LÄNSIRINTAMAN HÄVITTÄJÄLENTOKONEISSA

Jesper Kristiansson

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2011

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala





| | | |
|---|----------------------------------|---|
| Tekijä(t) KRISTIANSSON, Jesper | Julkaisun laji Opinnäytetyö | Päivämäärä 29.04.2011 |
| | Sivumäärä 75 | Julkaisun kieli SUOMI |
| | Luottamuksellisuus () saakka | Verkojulkaisulupa myönnetty (X) |
| Työn nimi POLTTOMOOTTORIEN KEHITTYMINEN ENSIMMÄISEN MAAILMANSODAN LÄNSIRINTAMAN HÄVITTÄJÄLENTOKONEISSA | | |
| Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikka | | |
| Työn ohjaaja(t) MATILAINEN, Jorma, yliopettaja | | |
| Toimeksiantaja(t) Keski-Suomen Ilmailumuseo. HAVIMO, Veikko, lentokonemekaanikko. | | |
| Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön aihe on Polttomoottorien kehittyminen ensimmäisen maailmansodan länsirintaman hävittäjälentokoneissa, ja se on tehty yhteistyössä Keski-Suomen Ilmailumuseon kanssa. Lähteinä on käytetty Ilmailumuseon kirjastosta löytyneitä lentokonemoottorikirjoja sekä aihetta tuntevia asiantuntijoita.</p> <p>Alussa esitellään polttomoottorin perustoiminnot: tahtiperiaate, moottorin jäähdytys ja voitelu, kaasutin- sekä sytytysjärjestelmät. Tämän jälkeen pohditaan yleisiä vaatimuksia ensimmäisen maailmansodan aikaisen hävittäjälentokoneen polttomoottorille.</p> <p>Seuraavaksi esitellään kolme moottorityyppiä: rivimoottori, V-moottori ja pyörivä tähtimoottori. Näiden yhteydessä tutustutaan moottorityyppien sodassa käytettyihin moottorimalleihin. Moottorimallit esitellään tarkasti kuvia apuna käyttäen. Luvussa vertaillaan hieman moottoreiden suorituskykyä ja teknisiä konstruktioita.</p> <p>Lopuksi tarkastellaan sodanaikaisissa polttomoottoreissa tapahtunutta kehitystä vuosina 1914–1918. Kehittymistä tapahtui etenkin perustekniikan saralla. Moottoreiden tuottama teho kasvoi ja paino väheni. Alumiinin käyttö moottorinvalmistuksessa yleistyi, ja sillä saavutettiin huomattavia hyötyjä muihin materiaaleihin verrattuna. Sodan aikana kehitettiin myös uusi moottorityyppi: korkealentomoottori, joka on suunniteltu toimimaan tehokkaasti yli 4000 metrin korkeudessa. Sotajan kokemukset antoivat puhtia kehitellä myös vielä nykyäänkin yleisenä lentokonemoottorina toimiva tähtimoottori.</p> <p>Opinnäytetyö on kattava kuvaus ensimmäisen maailmansodan hävittäjissä käytetyistä moottoreista sekä näissä tapahtuneesta kehityksestä.</p> | | |
| Avainsanat (asiasanat) Polttomoottori, ensimmäinen maailmansota, sotahistoria, konetekniikka, hävittäjä, länsirintama, museo. | | |
| Muut tiedot | | |



| | | |
|---|--|--|
| Author(s) KRISTIANSSON, Jesper | Type of publication Bachelor's Thesis | Date 29042011 |
| | Pages 75 | Language FINNISH |
| | Confidential () Until | Permission for web publication (X) |
| Title The development of combustion engines used in the fighter airplanes of the Western front of the First World War. | | |
| Degree Programme Mechanical and Production Engineering | | |
| Tutor(s) MATILAINEN, Jorma, Principal Lecturer | | |
| Assigned by Keski-Suomen Ilmailumuseo (The Aviation Museum of Central Finland). HAVIMO, Veikko, Airplane mechanic | | |
| Abstract <p>The subject of this Bachelor's Thesis was the development of combustion engines used in the fighter airplanes in the First World War. The thesis project was carried out in co-operation with the Aviation Museum of Central Finland. The books from the Aviation Museum's library were used as the main source of information and some experts who know a lot of the subject were interviewed.</p> <p>In the beginning the basics of a combustion engine are described: the four stroke cycle, the cooling and lubrication systems of an engine, the carburetor and ignition systems and so on. After this the general requirements of a combustion engine used in a world war one fighter airplane are studied.</p> <p>Next the three main types of engines are introduced: the in-line engine, the V-engine and the rotary engine. The main models which have been used during the Great War are also introduced. These models are described in detail with the help of pictures. The performances and the mechanics of these engines are described.</p> <p>In the end the development taken place in these aircraft engines is examined. The basic mechanics in the engines developed a lot. The power output increased and the weight of the engines decreased. The use of aluminum became more common and this caused a lot of progress compared to the materials used before. A new type of engine was developed during the war: a high altitude engine which was planned to operate efficiently in altitudes over 4000 meters. The radial engine which is nowadays a common aircraft engine was also developed during the First World War.</p> <p>This Bachelor's Thesis is an extensive description of the combustion engines used in the fighter airplanes of the First World War and of the development which occurred in them.</p> | | |
| Keywords Combustion engine, First World War, military history, mechanical engineering, fighter, Western Front, museum. | | |
| Miscellaneous | | |

SISÄLTÖ

| | |
|--|----|
| 1 LENTOKONEPOLTTOMOOTTORIEEN MIELENKIINTOISTA HISTORIAA TUTKIMASSA | 3 |
| 2 LENTOKONEPOLTTOMOOTTOREIDEN TOIMINTA..... | 4 |
| 2.1 Lämpövoimakoneen historia | 4 |
| 2.2 Polttomoottorin tahtiperiaate | 4 |
| 2.3 Kampimekanismi..... | 6 |
| 2.4 Venttiilinohjausjärjestelmä | 6 |
| 2.5 Kaasutinjärjestelmä..... | 7 |
| 2.6 Sytytysjärjestelmä | 8 |
| 2.7 Polttoaineet..... | 9 |
| 2.8 Moottorin voitelu | 11 |
| 2.9 Moottorin jäähtyminen..... | 12 |
| 3 YLEISIÄ VAATIMUKSIA ENSIMMÄISEN MAAILMANSODAN AIKAISILLE LENTOKONEPOLTTOMOOTTORILLE | 14 |
| 3.1 Luotettavuus | 14 |
| 3.2 Keveys, teho ja taloudellisuus..... | 15 |
| 3.3 Ilmanvastus..... | 16 |
| 3.4 Liikkuvien osien tasapaino ja vääntö..... | 16 |
| 3.5 Tuotannon ja huollon helppous..... | 17 |
| 4 ENSIMMÄISEN MAAILMANSODAN LÄNSIRINTAMAN HÄVITTÄJIEEN POLTTOMOOTTORITYYPIT | 18 |
| 4.1 Rivimoottori..... | 19 |
| 4.1.1 Rivimoottorin toimintaperiaate | 19 |
| 4.1.2 Mercedes D.III | 20 |
| 4.1.3 Benz | 22 |
| 4.1.4 BMW III | 23 |
| 4.1.5 Argus | 25 |
| 4.1.6 Beardmore | 25 |
| 4.2 V-moottori | 26 |
| 4.2.1 V-moottorin toimintaperiaate | 26 |
| 4.2.2 Hispano-Suiza 8 | 26 |
| 4.2.3 Rolls-Royce Eagle & Falcon..... | 30 |
| 4.2.4 RAF 4 | 32 |
| 4.2.5 Wolseley Viper & Python..... | 32 |
| 4.3 Pyörivä tähtimoottori | 33 |
| 4.3.1 Pyörivän tähtimoottorin toimintaperiaate | 33 |
| 4.3.2 Le Rhône..... | 36 |
| 4.3.3 Gnome Monosoupape..... | 40 |
| 4.3.4 Oberursel | 41 |
| 4.3.5 Clerget 9..... | 42 |
| 4.3.6 Siemens-Halske | 44 |
| 4.3.7 Bentley BR. 1 | 47 |
| 5 POLTTOMOOTTORIEEN KEHITTYMINEN ENSIMMÄISEN MAAILMANSODAN AIKANA..... | 47 |
| 5.1 Kehittymisen tarkastelua..... | 47 |
| 5.2 Perustekniikan kehittyminen | 48 |
| 5.3 Painon väheneminen ja tehon kasvu | 49 |
| 5.4 Alumiinin käyttö..... | 50 |

| | |
|--|----|
| 5.5 Korkealentomoottorit..... | 51 |
| 5.6 Tähtimoottorin synty..... | 52 |
| 5.7 Teoreettinen suorituskykyvertailu | 53 |
| 6 LOPPUSANAT | 55 |
| LÄHTEET | 58 |
| LIITTEET | 61 |
| Liite 1. Lentokonemoottoreiden teoreettinen suorituskykyvertailu..... | 61 |
| Liite 2. Ensimmäisen maailmansodan hävittäjissä käytetyt moottorit ja hävittäjät, joissa niitä käytettiin..... | 62 |

KUVIOT

| | |
|---|----|
| KUVIO 1. Nelitahtimoottorin tahdit..... | 5 |
| KUVIO 2. Hispano-Suiza 8Aa:n nokka-akseli..... | 7 |
| KUVIO 3. Gnome Monosoupape -moottorin sytytysjärjestelmä | 9 |
| KUVIO 4. Le Rhône 9C -moottorin sylinterin jäähdytysrivat | 13 |
| KUVIO 5. Albatros D.III -hävittäjä, jossa on Mercedes D.III –rivimoottori..... | 16 |
| KUVIO 6. Mercedes D.III -moottorin halkileikkaus | 21 |
| KUVIO 7. Benz Bz.IV 200hv -moottori | 22 |
| KUVIO 8. BMW IIIa -moottori | 24 |
| KUVIO 9. Hispano-Suiza 8Ab -moottori | 28 |
| KUVIO 10. Rolls-Royce Eagle VIII..... | 31 |
| KUVIO 11. Pyörivän tähtimoottorin kampikoneisto: Gnome Monosoupape.... | 33 |
| KUVIO 12. Pyörivän tähtimoottorin venttiilinojhauskoneisto: Siemens-Halske Sh.III | 35 |
| KUVIO 13. Le Rhône 9C 80hv -moottori..... | 36 |
| KUVIO 14. Le Rhône'n kiertokankien kiinnitysurat | 37 |
| KUVIO 15. Le Rhône'n sylinterinkansi | 38 |
| KUVIO 16. Clerget 9 B -moottori..... | 43 |
| KUVIO 17. Siemens-Halske Sh.III:n kammiorengas ja kiertokanget | 45 |
| KUVIO 18. Siemens-Halske Sh.III osina..... | 46 |
| KUVIO 19. Lentokoneiden lentonopeuden muutos 1900-luvun alussa | 48 |
| KUVIO 20. Fokker-yksitaso lähdössä lentoon luultavasti vuonna 1915 | 56 |

1 LENTOKONEPOLTTOMOOTTORIEN MIELENKIIN- TOISTA HISTORIAA TUTKIMASSA

Valitsin opinnäytetyöni aiheeksi ensimmäisen maailmansodan lentomoottorit, koska olen koko ikäni ollut kiinnostunut sotahistoriasta. Kiinnostukseni ensimmäisen maailmansodan ilmailua kohtaan heräsi jo alle kymmenvuotiaana. Ilmailun alkuaikoina tekniset ratkaisut olivat erittäin kiehtovia! Esimerkiksi pyörivän tähtimoottorin tekniikka on omalla tavallaan erittäin nerokas.

Tutkin ensimmäisen maailmansodan lentokonemoottoreita Keski-Suomen Ilmailumuseolla, josta löytyy kattavampi lähdekirjallisuusaineisto kuin olisin uskaltanut kuvitellakaan. Haastattelin museon erittäin asiantuntevaa henkilökuntaa ja tutustuin museolla oleviin ensimmäisen maailmansodan aikaisiin lentomoottoreihin.

Tavoitteenani oli koota suomenkielinen esitys siitä, miten lentokonemoottorit kehittyivät ensimmäisen maailmansodan aikana. Halusin myös esitellä senaikaisten moottorien toimintatekniikan tarkasti, koska näitäkään tietoja ei ole kootusti missään suomenkielisessä teoksessa.

Keskityin ainoastaan ensimmäisen maailmansodan länsirintamalla käytettyjen hävittäjälentokoneiden polttomoottoreihin, joten vertailusta jäi pois muutamia maineikkaita pommikoneissa ja tiedustelukoneissa käytettyjä moottoreita. Keskityin länsirintaman hävittäjiin, koska vuosina 1914–1918 länsirintama oli edistyneimmän ilmasodankäynnin näyttämö.

Raportissa lukijalle tulee tutuksi aika, jolloin bensiinin oktaanilukuja ei tunnettu, 6:1 oli polttomoottorissa korkea puristussuhde ja nopeakäyntinen moottori kiersi 2000 kierrosta minuutissa.

2 LENTOKONEPOLTTOMOOTTOREIDEN TOIMINTA

2.1 Lämpövoimakoneen historia

Polttomoottori on lämpövoimakone, joka muuttaa palamisreaktiossa vapautuvan energian mekaaniseksi energiaksi. Lämpöä vapauttavassa eksotermisessä reaktiossa palamisen väliaineena käytetty ilma lämpenee voimakkaasti. Ideaalikaasulain mukaan ilman tilavuus kasvaa lämpötilan mukana: jos kaasu ei pääse laajenemaan suljetussa tilassa, sillä on painetta. Tässä tilanteessa lämpöenergia on muuttunut mekaaniseksi energiaksi, paine-energiaksi. Pyörimisliikkeeksi paine-energia muutetaan männän ja kampikoneiston avulla. (Sarmi 1973, 10–12.)

Polttomoottoreita on yritetty valmistaa jo antiikin ajoista lähtien. Heron Aleksandrialainen valmisti eräänlaisen kuumailmaturbiinin jo 150 eaa. Polttomoottorin periaatteella toimivia höyrykoneita valmistettiin jo 1700-luvulla. Uudemalla ajalla varsinaisen polttomoottorin keksimistä hidastutti sopivan polttoaineen puute. 1800-luvun alkuvuosina Philippe Lebon keksi moottorin sähkösytytyksen. (Sarmi 1973, 14–15.)

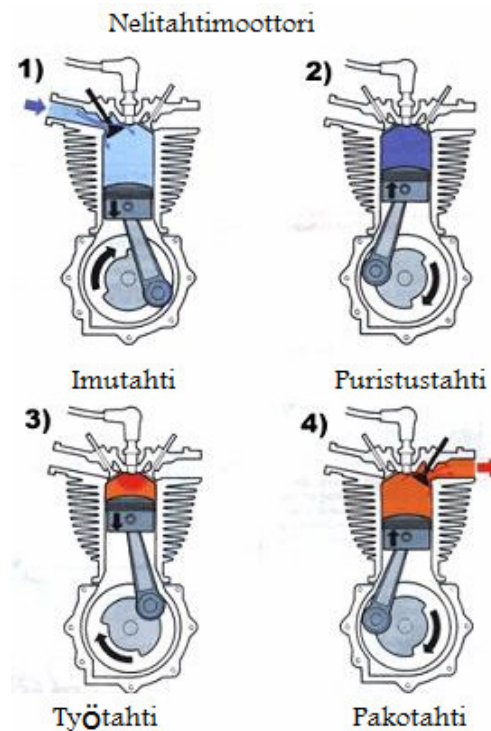
1800-luvun keskivaiheilla belgialainen insinööri Lenoir kokeili valokaasua moottorinsa polttoaineena ja onnistui luomaan ensimmäisen toimivan polttomoottorin. Nelityötahtityötapa keksittiin 1862 ja bensiini otettiin polttoaineeksi polttomoottoreihin vuonna 1874. Kaasuttimen keksi Wilhelm Maybach 1893, ja vuonna 1902 Simms ja Bosch keksivät suurjännitemagneeton. Muita mäntämoottorin alkuaikojen pioneereja olivat mm. Nikolaus Otto, Gottlieb Daimler, René Panhard, Dugald Clerk ja James Atkinson. (Sarmi 1973, 14–15.)

2.2 Polttomoottorin tahtiperiaate

Nelitahtisen polttomoottorin toiminnassa on neljä vaihetta. Kun jokaisen vaiheen aikana mäntä liikkuu koko iskupituutensa kuolokohdasta toiseen, moot-

tori toimii nelitahtiperiaatteella. Yhden tahdin aikana mäntä siis kulkee koko iskupituutensa. (Sarmi 1973, 19–20.)

Ensimmäisessä tahdissa, imutahdissa, polttoaine-ilmaseos virtaa sylinteriin. Toisessa tahdissa, puristustahdissa, seos puristuu pieneen, männän ja sylinterin rajaamaan tilavuuteen. Kolmatta tahtia kutsutaan työtahdiksi: kaasuseos palaa ja sylinteriin syntyy painetta, jolloin mäntä liikkuu alaspäin ja moottori tekee mekaanista työtä. Neljännessä tahdissa palaneet kaasut poistuvat sylinteristä ja kierto alkaa alusta. Neljättä tahtia sanotaan pakotahdiksi. (Sarmi 1973, 19–20.)



KUVIO 1. Nelitahtimoottorin tahdit (How a 4 Stroke Engine Works. n.d. Käännetty)

Kuvion 1 avulla huomataan, että kierto-prosessin aikana mäntä käy kaksi kertaa yläkuolokohdassaan ja kaksi kertaa alakuolokohdassaan, eli kampiakseli tekee kaksi kierrosta yhtä työtahtia kohden.

2.3 Kampimekanismi

Kun polttoaine-ilmaseos räjähtää sylinterissä, syntyy männän liikkeen suuntainen voima. Mäntä on kiinnitetty kiertokankeen, joka puolestaan on kiinni kampiakselilla. Kun mäntä painuu alas, se siirtää kaasun paineen kiertokan- gen avulla kampiakselille. (Sarmi 1973, 23; Mäkelä 1930, 58.)

Kaasun paine liikuttaa mäntää, joten männän ja sylinterin välin on oltava tiivis. Männässä on tiivistystä varten kahdesta neljään kappaletta kapeaa männän tiivistysrengasta. (Mäkelä 1930, 56.)

Mäntä kiinnitetään kiertokankeen männäntapilla. Kiertokanki on laakeroitu mo- lemmista päistään, kiertokan- gen ja kampiakselin kammen laakeri on yleensä V- ja rivimoottoreissa kaksiosainen. Kiertokan- geen vaikuttaa suuri edestakai- nen vertikaalinen voima, mutta myös pieni sivuttainen voima, jonka mäntä yleensä välittää sylinterin seinään. (Mäkelä 1930, 58; Sarmi 1973, 23.)

Kampiakseli muuttaa kaasun paineen edestakaisen liikkeen pyörimisliikkeeksi ja luo moottorille mekaanista tehoa. Kaikki moottorin mekaaniset laitteet otta- vat käyttötehonsa kampiakselilta. Kampiakseli on laakeroitu kampikammioon, ja jokaiseen sen kampeen on laakeroitu kiertokanki. (Mäkelä 1930, 59.)

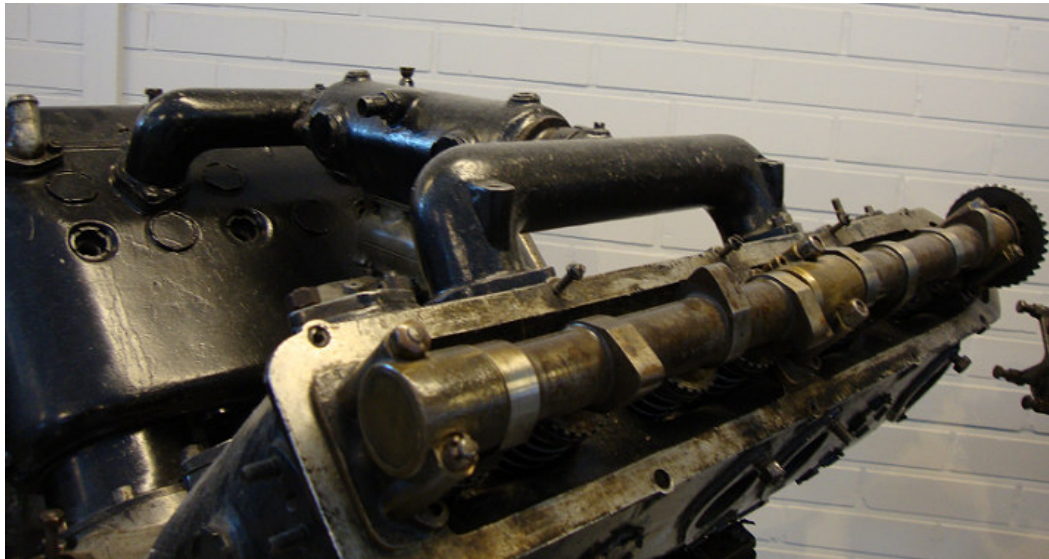
2.4 Venttiilinohjausjärjestelmä

Polttomoottorissa venttiilit ohjaavat kaasun sisään- ja ulosvirtausta sylintereis- sä. Venttiilit sijaitsevat sylinterin kannessa. Sylinteriin imetty ilma on kylmää ja pakokaasu puolestaan hyvin kuumaa, joten imu- ja pakoventtiilit valmistetaan usein eri aineista. (Mäkelä 1930, 53.)

Yleensä polttomoottoreissa venttiilejä ohjaa nokka-akseli, joka saa pyörimis- voimansa kampiakselilta. Pyörivässä tähtimoottorissa varsinaista nokka- akselia ei ole, vaan venttiilejä ohjaa nokkalevy. Nelitahtimoottorissa imu- ja pakotahti on joka toisella kampiakselin kierroksella. Imuventtiili aukeaa vain

imutahdin aikana, pakoventtiili vain pakotahdin aikana. Tämän takia kampiakselin tulee pyöriä kaksi kierrosta siinä ajassa, missä nokka-akseli pyörähtää kerran. Kampiakseli siis pyörittää nokka-akselia hidastavalla välityksellä 2:1. (Sarmi 1973, 51; Mäkelä 1930, 54.)

Nokka-akseli sijaitsee yleensä kampikammiossa tai sylinterien päällä. Nokka-akselilla on jokaista venttiiliä varten pieni laippa, nokka. Sylinterien päällä olevan nokka-akselin pyöriessä nämä nokat painavat venttiilit auki, kuten kuviossa 2 nähdään. Sylinterien alapuolisen nokka-akselin nokat liikuttavat työntö-tankoja, jotka painavat keinuviipuja, jotka puolestaan avaavat venttiilit. Venttiilit sulkeutuvat miltei aina jousivoimalla. (Sarmi 1973, 51.)



KUVIO 2. Hispano-Suiza 8Aa:n nokka-akseli

2.5 Kaasutinjärjestelmä

Ensimmäisen maailmansodan lentokonemoottoreissa polttoaine virtaa painovoiman avulla alempana olevaan kaasuttimeen. Varsinaista polttoainepumpua ei ollut, ja tämä niin sanottu omapainejärjestelmä lisäsi tulipalon riskiä huomattavasti. (Mäkelä 1930, 61; Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 19.)

Yleisesti ensimmäisen maailmansodan aikoina ilman ja bensiinin sopivana palamissuhteena pidettiin suhdelukuja 14:1 - 20:1. Mitä heikompi sytytyskipinä on, sitä vahvempaa kaasun on oltava syttyäkseen. Vahvalla kaasuseoksella puolestaan palamisjätteitä syntyy enemmän. (Mäkelä 1930, 65.)

Imutahdin aikana kaasutin imee kaasuttimen kurkun aiheuttaman paine-eron avulla polttoainetta sumuna imuilmavirtaan sovitetusta ohuesta putkesta eli suuttimesta. Imuilma sekoittuu polttoainesumuun ja kulkeutuu sylinteriin, jossa siitä muodostuu räjähtävä seos. Moottorin käyntiä muutellaan säätämällä kaasuttimen säätöläppää, joka määrää sylinteriin virtaavan polttoaine-ilmaseoksen määrän. (Mäkelä 1930, 66; Sarmi 1973, 68.)

Jotta polttoaine-ilmaseoksen sekoitussuhde pysyisi tasaisena kaikissa tilanteissa, kaasuttimeen on rakennettava tasausjärjestelmä. Itsetoimiva lisäilma-venttiili tai polttoainevirtauksen kuristaminen ovat eräitä ratkaisuja. (Mäkelä 1930, 67; Sarmi 1973, 69.)

2.6 Sytytysjärjestelmä

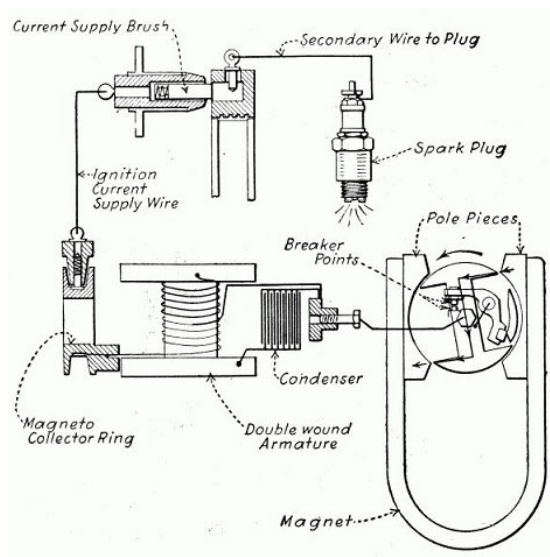
Lentokonemoottorin sylinterissä kaasuseos sytytetään sähkökipinällä. Sytytysjärjestelmä kehittää kipinään tarvittavan jännitteen ja energian sekä aiheuttaa kipinän sylinterissä oikealla hetkellä. Kuviossa 3 on esitelty Gnome-lentokonemoottorin sytytysjärjestelmä. (Sarmi 1973, 78.)

Kipinän energianlähteenä toimii lentomooottoreissa korkeajännitemagneetto. Magneetto on magnetoitu sähkögeneraattori, joka tuottaa vaihtovirtaa. Magneeton etuja akkuun nähden ovat keveys, halpuus ja vähäinen huollon tarve. (Sarmi 1973, 79.)

Akun ja magneeton tarjoama jännite on kuitenkin liian pieni tuottaakseen tarpeeksi ison sytytyskipinän. Jännitettä nostetaan katkojan ja sytytyspuolan avulla. Sytytyspuola on muuntaja, jonka toiminta perustuu sähkövirran synnyttämän magneettikentän muuttumisnopeuteen. (Sarmi 1973, 79.)

Kaasuseoksen sytyttävä kipinä hyppää sytytystulpan kärkien välissä. Koska kipinöinti tapahtuu palotilassa, on sytytystulpan kiinnityksen oltava paineenkestävä ja tiivis. Tulppa ei saa lämmitä liikaa, ettei tulpan hehkuva pinta sytytä kaasuseosta. Se ei saa olla liian kylmäkään, ettei tulppa nokeennu ja mene oikosulkuun. (Sarmi 1973, 80.)

Virranjakaja ajoittaa kipinän juuri oikealle hetkelle yhdistämällä virran sen sylinterin sytytystulppaan, jossa puristustahti on loppuvaiheessaan. Täytyy muistaa, että kaasuseoksen palamisessa kuluu aikaa: kipinää ei saa ajoittaa männän yläkuolokohdalle, vaan hetkelle juuri sitä ennen. Tätä kutsutaan sytytysennakoksi. Sytytysennakkoa ei voi asettaa vakioksi, koska hieman erilaisien polttoaineiden ominaisuudet ja kaasuseoksen väkevyys vaikuttavat syttymisnopeuteen. (Sarmi 1973, 80–81; Mäkelä 1930, 87.)



KUVIO 3. Gnome Monosoupape -moottorin sytytysjärjestelmä (The Nieuport 28. n.d.)

2.7 Polttoaineet

Ensimmäisen maailmansodan aikaan polttomoottorin yleisin polttoaine oli bensiini. 1910-luvulla bensiinin kovan hinnan takia eurooppalaiset insinöörit

kokeilivat polttoaineina myös bentsolia, alkoholia ja petrolia. (Pagé 1929, 203–204.)

Ensimmäisen maailmansodan aikana polttoaineiden oktaanilukuja ei vielä tunnettu. Sodanaikainen bensiini oli kuitenkin oktaaniluvultaan pienempää kuin nykyinen bensiini, noin 87-oktaanista. Polttoaineiden ominaisuuksiin ei tuolloin ollut vielä perehdytty kovin tarkkaan ja on hyvin mahdollista, että mikäli polttoaineet olisi tunnettu paremmin, lentokonemoottorit olisivat olleet luotettavampia ja tehokkaampia. (Havimo 2011; Virtanen 2011.)

Esimerkiksi sodanaikaisissa Rolls-Royce-moottoreissa suositeltiin käyttämään polttoainetta, joka on 80-prosenttisesti bensiiniä ja 20-prosenttisesti bentsolia. (Jane's Fighting Aircraft of World War I 1990, 313.)

Kivihiilestä valmistettua bentsolia käyttämällä, joko sinällään tai bensiinillä jatkettuna, saavutetaan tiettyjä etuja bensiiniin nähden. Bentsoli lisäsi hieman tehoa, takasi pienemmän kulutuksen suhteessa lentonopeuteen ja moottori kävi tasaisemmin. Bentsolia käyttämällä puristussuhdetta voidaan lisätä, eikä synny turhaa nakutusta. Joskus bentsoli on jopa halvempaa kuin bensiini. Bentsoli kuitenkin jäätyy kuudessa celsiusasteessa, joten sen käytön kanssa tulee olla hyvin varovainen. Kun sekaan lisää hieman bensiiniä tai tolueenia, polttoaineen pakkaskestävyys paranee. (Pagé 1929, 206–207; Airas 1922, 24.)

Sodan aikana esimerkiksi BMW-lentomoottorin puristussuhdetta 6,4:1 pidettiin hyvin korkeana. Kun tällaisessa korkeapuristussuhteisessa moottorissa käytetään bensiiniä, moottorissa syntyy haitallista nakutusta. Krakattu bensiini, polttoöljyn ja bensiinin seos, ei ole yhtä altis nakutukselle ja sitä käytettiin myös lentomoottoreissa. (Pagé 1929, 203–204.)

2.8 Moottorin voitelu

Voitelu on tarpeellista kaikkialla, missä pinnat liukuvat toisiinsa nähden. Voiteluaineiden tarkoitus on vähentää kitkaa näiden liukupintojen välillä. Moottoreissa männät liikkuvat sylintereissä, akselit laakereissaan ja venttiilit ohjaimissaan. Voiteluöljy luo öljykalvon metallien pinnoille, joten kuluminen vähenee. Öljyn liukkaus vähentää kitkaa, joten kitkalämmön määrä vähenee. (Sarmi 1973, 93; Mäkelä 1930, 15.)

Moottorissa kiertovoitelujärjestelmää ohjaa kampiakselilta käyttövoimansa saava öljypumppu, joka painaa öljyn putkia ja kanavia pitkin jokaiseen voitelukohteeseen, joista öljy lopulta valuu moottorin pohjalle öljypohjaan. Jotta öljykalvo muodostuu, on voideltavalle kohteelle tuotava riittävä määrä öljyä ja levitettävä se voideltavalle pinnalle. Voitelujärjestelmä tuo öljyn voideltavaan kohteeseen, ja öljy leviää voideltaville pinnoille näiden pintojen liikkeen avulla. (Sarmi 1973, 94, 97.)

Voitelevan öljykalvon on oltava riittävän paksu. Se voi hävitä kaapiutumalla, polttoaineen liuottamana tai moottorin kuumuuden höyrystämänä. Öljy voi heiketä palamisen, likaantumisen, vaahtoutumisen ja hapettumisen takia liikaa, jolloin se ei enää aja asiaansa. Lisäksi öljy voi oheta lämmitessään, tai jos siihen sekoittuu ohuempia nesteitä. Öljymäärä vähenee myös käyttöajan myötä. (Sarmi 1973, 94.)

Voiteluöljyn on oltava viskositeetiltaan sopivaa. Viskositeetillä tarkoitetaan nesteen kykyä vastustaa virtausta. Öljyn on oltava sopivaa jähmepisteeltään, joka ilmaisee, kuinka hyvin öljy sopeutuu talviolosuhteisiin. Jos öljy on jähmettynyttä matalan ulkolämpötilan takia, ei voitelujärjestelmä voi siirtää öljyä moottorissa. Öljyissä käytetään myös niiden ominaisuuksia parantavia lisäaineita. (Sarmi 1973, 95.)

2.9 Moottorin jäähdytys

Jäähdytyksellä voidaan katsoa olevan kolme tarkoitusta. Jäähdytyksen tehtävä on pitää moottorin rasitettujen osien lämpötila riittävän matalalla, jotta niiden rakenneaineiden lujuus pysyy tarpeeksi suurena. Jäähdytys pitää liukupintojen lämpötilan niin alhaalla, että voitelu onnistuu öljyn ohenematta, höyrystymättä ja kuivatislaantumatta. Lisäksi jäähdyttämällä vähennetään lämpötilaeroja moottorissa, jolloin lämpölaajenemisen haitat, välysten muutokset ja lämpöjännitykset pysyvät sallituissa rajoissa. (Sarmi 1973, 22.)

Palaminen tapahtuu sylinterissä ja siellä lämpötila kasvaa voimakkaimmin, joten jäähdytys keskittyy sylinteriä ympäröiviin pintoihin: kanteen, mäntään ja sylinterin vaippaan. Moottorissa kaasujen keskilämpötila on jopa yli 500 celsiusastetta. Sylinterin seinämä ei saisi olla yli 200-asteinen, jotta voitelu onnistuisi. (Sarmi 1973, 22, 99.)

Männän vaipasta siirtyy sylinteriin vain vähän lämpöä, koska niiden välissä on välykset sekä lämpöä eristävä voitelukalvo. Suurin osa männän lämmöstä poistuu männänrenkaiden kautta sylinterin seinään. Tiivistyksen takia ei ole mielekästä kasvattaa männänrenkaiden leveyttä, joten jos jäähdytys ei riitä, lisätään männänrenkaiden lukumäärää. (Sarmi 1973, 101.)

Ilmajäähdytteisessä moottorissa sylinterin ulkopintaan tehdään sen pinta-alaa kasvattavat jäähdytysrivat jäähdytyksen tehostamiseksi. Ilmajäähdytyksen etuja ovat, että siinä ei ole jäätymis- eikä vuotovaaroja, syöpyminen on vähäistä, nesteen tuomaa lisäpainoa ei tarvita ja moottori lämpenee nopeasti käyntilämpötilaan. (Sarmi 1973, 100.)

Koska pyörivässä tähtimoottorissa pyörimisen aiheuttama ilmavirtaus on suurempi kuin lentämisen ilmavirta, sylinterien kansien jäähdytysrivat ovat auki moottorin pyörimissuuntaan, kuten kuvio 4 osoittaa.



KUVIO 4. Le Rhône 9C -moottorin sylinterin jäähdytysrivat

Ilmajäähdytteisen moottorin eduksi sotilaskoneissa on mainittava vielä se, että se ei haavoitu yhtä herkästi kuin vesijäähdytteinen moottori. Jos ilmajäähdytteisen sylinterin lävistää luoti, koko moottorin toiminta ei häiriinny. Vesijäähdytteisen sylinterin vahingoittuessa samalla tavalla jäähdytysvesi pakenee nopeasti luodinreiästä ja koko moottori saattaa ylikuumeta ja leikata kiinni. (Mäkelä 1930, 102.)

Vesijäähdytyksellä on monia hyviä puolia: vesijäähdytys on aina tehtävissä riittävän tehokkaaksi, nestevaippa vaimentaa moottorin käyntiääntä, moottori voidaan esilämmittää lämmittämällä jäähdytysnestettä ja lämminnyttä jäähdytysnestettä voidaan käyttää imuilman lämmityksessä (Pagé 1929, 550–551).

Vesijäähdytteisten moottoreiden huonoja puolia ovat nesteen jäätymis-, kiehumis- ja vuotovaarat, moottorin syöpyminen nesteen vaikutuksesta ja se, että

jäähdytysneste järjestelmiseen tuo moottorille paljon lisäpainoa. Ensimmäisen maailmansodan hävittäjälentokoneissa jäähdytin on yleensä asennettu joko moottorin eteen tai lentokoneen siipiin. (Pagé 1929, 550–551.)

Lentokonemoottorin lämmöstä 36 % häviää jäähdytyksen myötä ja 36 % pakokaasujen myötä. Moottorin kitka syö lämmöstä noin 6 % ja potkurin häviöt syövät jäljelle jääneestä moottorin tehosta vielä neljänneksen. Moottorin polttoaineesta noin 15 % siirtyy suoraan lentoteholle. (Pagé 1929, 65.)

3 YLEISIÄ VAATIMUKSIA ENSIMMÄISEN MAAILMAN-SODAN AIKAISELLE LENTOKONEPOLTTOMOOTTORILLE

3.1 Luotettavuus

Ensimmäisen maailmansodan aikaan ilmailu oli hyvin nuori ala. Lentokoneista ei ollut paljoa kokemuksia, ja lentokonepolttomoottorin erityiset tarpeet esimerkiksi autojen moottoreihin verrattuna olivat vielä hieman hämärän peitossa. Lentomoottoreita ei voikaan suoraan verrata autojen moottoreihin, koska ne poikkeavat toisistaan melko paljon.

Lentomoottorit joutuvat toimimaan tasaisesti lähes täydellä teholla pitkiä aikoja ilman, että lentäjän tarvitsee kiinnittää paljoa huomiota tehojen säätämiseen. Lentokone on täysin riippuvainen moottoristaan toisin kuin esimerkiksi ilmalai-va. Jos lentokoneen moottori sammuu, on pakko tehdä vaarallinen pakkolasku. (Wallace 1920, 7; Pagé 1929, 19.)

Korkeuden kasvaessa lämpötilan, tiheyden ja paineen arvot pienenevät. 11 kilometrin korkeuteen asti lämpötila laskee 6,5 celsiusastetta joka kilometri. Lämpötilan ollessa nollan tuntumassa merenpinnan korkeudella, 6000 metrin korkeudessa se on siis jo -39 celsiusta. Lentoviima lisää pakkasen hyytävyyttä entisestään. Lentokoneen ja sen moottorin on kyettävä toimimaan luotettavas-

ti suurista ulkoilman lämpötilaeroista huolimatta. (Hoffren & Saarela 2008, 24–25.)

Sodan aikana sotilaskoneet yleensä siirrettiin koulutustehtäviin, kun niillä oli lennetty sotalentoja tietty tuntimäärä, esimerkiksi sata tuntia. Näin sotilaskoneet palvelivat tärkeillä sotilaslennoilla aina luotettavimmassa iässään. (McCudden 1997, 47.)

3.2 Keveys, teho ja taloudellisuus

Yksi tärkeimmistä lentokonemoottorin ominaisuuksista on, että se tuottaa mahdollisimman paljon tehoa ja painaa mahdollisimman vähän. Ensimmäisten henkilöautojen moottoreiden paino-tehosuhde oli 7-14 kilogrammaa hevosvoimaa kohden. Sodanaikaisten hävittäjälentokoneiden moottorien paino-tehosuhde on vain noin 1-2 kilogrammaa hevosvoimaa kohden. (Wallace 1920, 8; Pagé 1929, 19.)

Mitä vähemmän moottori painaa, sitä enemmän hyötykuormaa lentokone voi kantaa; mitä kevyempi lentokone ja tehokkaampi moottori, sitä paremmat suoritusarvot. Erityisesti hävittäjissä paino on rajoittava tekijä. Liian painava moottori tekee hävittäjälentokoneesta kömpelön ohjattavan. (Gersdorff, Grasmann & Schubert 1995, 35.)

Moottorin polttoaineen ja öljyn kulutus liittyy läheisesti moottorin painoon. Mitä taloudellisempi moottori on, sitä vähemmän polttoainetta ja öljyä moottori tarvitsee mukaansa ja on näin ollen kevyempi. Vähän polttoainetta ja voiteluainetta kuluttavalla moottorilla voidaan olla ilmassa kauemmin. (Wallace 1920, 8.)

3.3 Ilmanvastus

Ilmanvastus liittyy enemmän lentokonesuunnitteluun, mutta lentokonemoottorikin aiheuttaa ilmanvastusta. Mitä vähemmän tilaa moottori vaatii lentokoneessa, sitä parempi. (Wallace 1920, 8.)

Ensimmäisessä maailmansodassa hävittäjälentokoneissa käytettyjen moottoreiden ilmanvastus oli melko pieni ja moottorit peiteltiin usein suojapelleillä. Pyörivän tähtimoottorin aiheuttamasta pyörimisestä aiheutuu paljon ylimääräistä ilmanvastusta. Pitkä rivimoottori sulautuu aerodynaamisesti hyvin lentokoneen runkoon. Tämä näkyy hyvin kuviossa 5. (Wallace 1920, 8.)



KUVIO 5. Albatros D.III -hävittäjä, jossa on Mercedes D.III –rivimoottori (Early Aviation. 2008)

3.4 Liikkuvien osien tasapaino ja vääntö

Moottori ei saa aiheuttaa huomattavaa tärinää, ja jotta kone voisi kiertää korkeilla kierrosluvuilla ilman turhaa tärinää ja kulumista, kaikkien moottorin liik-

kuvien osien täytyy olla tasapainossa. Kevyessä hävittäjälentokoneessa moottorin voimakas värinä aiheuttaisi suuria ongelmia. (Wallace 1920, 9-10.)

Moottorin liikkuvilla osilla on yhden- tai kahdenlaista liikettä. Esimerkiksi männät liikkuvat edestakaisin suoraa linjaa muuttuvalla nopeudella, kampiakselilla on pyörivä liike yhteen suuntaan ja kiertokangella on sekä suoraa että pyörivää liikettä. (Wallace 1920, 9-10.)

Pyörivän massan voi tasapainottaa toisella pyörivällä massalla. Samaten edestakaista liikettä tekevän massan voi tasapainottaa samanlaisella vastamassalla. Jotta moottoriin saadaan hyvä tasapaino liikkuvien osien välille, sylinterit ja kammet on sijoitettava siten, että tietyt osat liikkuessaan toimivat vastamassoina toisille osille. Tästä syystä nelisynterissä rivimoottorissa männät liikkuvat pareissa. (Wallace 1920, 10.)

Jos moottorin liikkuvat osat eivät ole tasapainossa, moottorin osat ja kiinnitykset ovat kovilla. Muun muassa kampiakselin laakerit joutuvat liian kovan paineen alle, jos moottorissa ilmenee voimakkaita epätasapainossa olevia voimia. Tästä syntyy lisää kitkaa ja moottorin voitelu heikkenee. (Wallace 1920, 65–66.)

Moottorin väännön on oltava tasainen ja säännöllinen. Kampiakseli pyörii lyhyiden ja terävien impulssien vaikutuksesta. Mitä pienempiä nämä impulssit ovat ja mitä tiheämpi iskujen taajuus on, sitä tasaisempi moottorin vääntö on. Parempi vääntö saadaan lisäämällä moottoriin lisää sylintereitä, mutta siitä puolestaan seuraa monia muita ongelmia. (Wallace 1920, 9.)

3.5 Tuotannon ja huollon helppous

Lentokonemoottorit ovat kalliita valmistaa, koska niissä käytetään hyviä materiaaleja, osat koneistetaan tarkkaan ja laatua tarkkaillaan tehokkaasti. Moottorille asetetut ehdot on täytettävä mahdollisimman halvalla hinnalla. Materiaali-

en ja valmistuskustannusten on oltava mahdollisimman alhaiset – laadusta kuitenkin tinkimättä. (Pagé 1929, 38; Dechamps & Kutzbach 1921, 250.)

Tuotannon ja etenkin huoltamisen kannalta moottorin olisi hyvä olla rakenteeltaan yksinkertainen. Mitä monimutkaisempi moottori on valmistustekniikaltaan, sitä hitaampaa ja kalliimpaa sen valmistaminen on. Monimutkaisesti rakennetun moottorin huoltaminen on myös työläämpää.

Ensimmäisen maailmansodan aikana moottoritehtaiden tuotantokapasiteetti oli kovilla. Tarve parhaille moottoreille oli huutava eikä luvatuissa toimituksissa aina pystytty pysymään. Tästä syystä useita moottoreita valmistettiin myös toisten yritysten tehtaissa, mikä toisinaan johti saman moottorimallin laadullisiin eroihin. (Gersdorff ym. 1995, 34, 37.)

4 ENSIMMÄISEN MAAILMANSODAN LÄNSIRINTAMAN HÄVITTÄJIEN POLTTOMOOTTORITYYPIT

Tässä luvussa on esitelty länsirintamalla käytetyissä hävittäjissä olleet moottorityypit etuineen ja haittoineen. Jokaisen moottorityypin esittelyn jälkeen on kattava kuvaus tietyn moottorityypin edustavimmasta sodanajan moottorimallista ja sen jälkeen on listattu muut samantyyppiset sodanaikaisissa hävittäjissä käytetyt moottorit. Moottorimallien teoreettinen suorituskykyvertailu löytyy liitteestä 1. Liitteestä 2 löytyvät moottorimalleja käyttäneet hävittäjät.

Raportissa käytetään tehon yksikkönä hevosvoimaa, koska se on yleinen käytäntö vanhojen polttomoottoreiden tehoja ilmoitettaessa. Yksi hevosvoima on noin 735,5 wattia.

4.1 Rivimoottori

4.1.1 Rivimoottorin toimintaperiaate

Ensimmäisissä lentokoneissa käytettiin 4-sylinterisiä rivimoottoreita, mutta ne väistyivät kuusisylinterisen rivimoottorin tieltä melko nopeasti. Kuusisylinteriset rivimoottorit ovat hyvin luotettavia ja rivimoottori tarjoaa pienen ilmanvastuksen lentokoneen nokalla. Rivimoottori on teho-painosuhteessa painavin moottorityyppi ja vie pituussuunnassa lentokoneen rungossa eniten tilaa. (Wallace 1920, 10; Sarmi s. 21.)

Ensimmäisessä maailmansodassa etenkin saksalaiset ja itävaltalaiset suosivat rivimoottoreita. Lähes kaikissa saksalaisissa ensimmäisen maailmansodan hävittäjälentokoneissa on rivimoottori. Saksalaiset huomasivat, että rivimoottori sopii moottorityypeistä parhaiten sarjatuotantoon ja vaatii tuotantovaiheessa vähiten työtä. Rivimoottorit ovat siis olleet valmistuskustannuksiltaan halpoja. (Wallace 1920, 10–11.)

Kuusisylinterisen rivimoottorin tasapaino on erinomainen. Moottorin kammet on sijoitettu 120 asteen väleille: ensimmäinen ja kuudes, toinen ja viides sekä kolmas ja neljäs kampi muodostavat parin. Nämä parit tasapainottavat toisiinsa, jottei pääse syntymään ylimääräistä tärinää. Pitkän kampiakselin keskiosaan kohdistuu suuria voimia, joten sen on oltava hyvin luja ja jäykkä. (Wallace 1920, 59–60; Sarmi 1973, 21.)

Kaikissa käsiteltävissä rivimoottoreissa moottoreiden sylinterit ovat taotusta teräksestä koneistettuja. Moottorin valmistustekniikassa koneistaminen oli erittäin tarkkaa: monissa osissa toleranssi oli vähemmän kuin 0,01 millimetriä.

Rivimoottoreiden öljypohja viettää moottorin takaosaa kohti, ja jokaisessa moottorissa on öljypumppu erillisellä öljysäiliöllä. Öljypumppu toimii aina hammaspyörän välityksellä.

Kaikissa tarkastelluissa rivimoottoreissa on kaksi magneettoa. Jos toinen magneetto lakkaa toimimasta, toisen toiminta riittää takaamaan moottorin normaalin toiminnan. Lisäksi kaikissa on jokaista sylinteriä kohden kaksi sytytystulppaa. Kahdella sytytystulpalla polttoaine-ilmaseos syttyy tehokkaammin.

4.1.2 Mercedes D.III

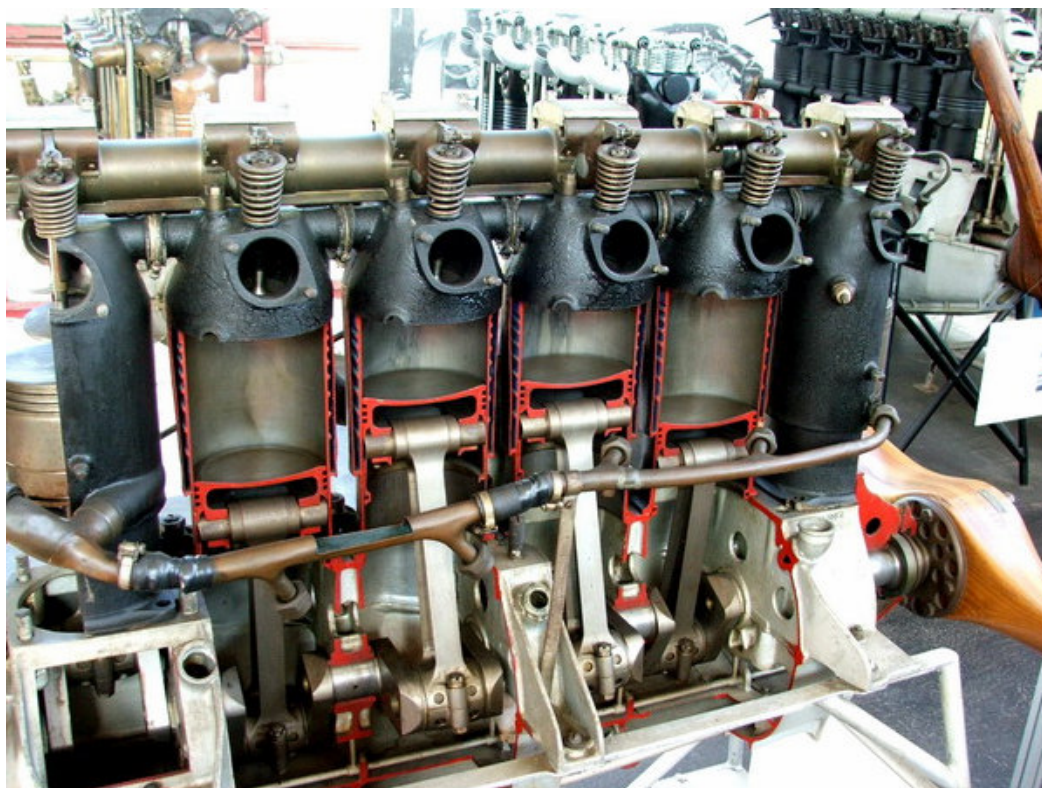
Mercedes D.III oli sarjatuotannossa jo vuonna 1914 ja suurilta osin juuri tämän moottorin ansiosta keskusvallat ottivat kuusisylinteriset rivimoottorit niin laajalti käyttöön lentokoneissaan. Moottori oli ensimmäinen, jossa oli onnistuneesti teräksiset sylinterit jäähdytysvaipoin. (Gunston 1986, 98.)

Mercedes D.III:ssa venttiilejä ohjaa sylinterien yläpuolinen, hyvin kevytrakenteinen nokka-akseli. Nokka-akseli on kiinnitetty pronssivalutukiin ja se pyörii kampiakselilta tulevalta kartiohammaspyörältä. Tämä kartiohammaspyörä pyörii yksi- tai puolitoistakertaisella nopeudella kampiakseliin nähden. Nokka-akselille pyörintänopeus alennetaan hammaspyörien välityksellä. (Gunston 1986, 98; Pagé 1929, 867.)

Samalla pystysuuntaisella akselilla on vesipumppu ja kartiohammaspyörä, joka ohjaa magneettoja. Vesipumpun aikaansaama vastus akselilla tasoittaa moottorin käyntiä eikä vaihteistossa synny niin paljon tärinää. (Pagé 1929, 867.)

D.III:n kaasutin on kaksikurkkuinen ja se on kiinnitetty moottorin kylkeen. Alumiinivalusta valmistetusta kaasuttimesta lähtee kaksi kolmelle sylinterille hauruvaa imuputkea. Juuri ennen kuin ilma tulee kaasuttimeen, se ehtii lämmentä jäähdyttäessään öljyä, jolloin höyrystyminen helpottuu. Imuputket ovat kuparia. (Pagé 1929, 867.)

Mercedes D.III –moottorin sisäosat näkyvät hyvin moottorin halkileikkauskuvassa kuviossa 6.



KUVIO 6. Mercedes D.III -moottorin halkileikkaus (Mercedes D.III Aviation Engine. 2008.)

Mercedes-moottoreissa on hyvin jäykkä kaksiosainen kampikammio. Moottorissa on poikkeuksellisen lyhyt kiertokanki, joka on huomattavasti vähemmän kuin kaksi kertaa iskunpituus (Pagé 1929, 867). Lyhyen kiertokangen ansiosta moottori voi olla matalampi.

Mercedes D.III -moottori on ensimmäisen maailmansodan aikana eniten valmistettu saksalaismoottori: moottoreita tehtiin noin 12000 kappaletta. Sodan edetessä moottorin teho lisääntyi D.IIIaü -mallissa jopa 200 hevosvoimaan ja Mercedes-moottorien korkealento-ominaisuudet kehittyivät muun muassa korotetun puristussuhteen ansiosta. (Gersdorff ym. 1995, 27; Page 1929, 866.)

Kampiakseli on tuettu seitsemällä laakerilla. Kampiakselin takapäähän on ruuvattu pala, joka muodostaa vastakappaleen vesipumpun hammaspyörälle. Kampiakselin takapäätä tukee kaksi aksiaalilaakeria. (Pagé 1929, 870.)

Kampikammio on hyvin jäykkä ja hyvin tuettu. Kampikammiossa on kolme aukkoa, joista keskimäinen toimii kanavana jäähdytysvesiputkelle ja kaksi muuta ovat kaasuttimen imuilman kanavia. (Pagé 1929, 871.)

Varhaisissa Benz-moottoreissa männät ovat valurautaa, myöhemmin Benzissäkin on otettu käyttöön alumiinimännät. Männän yläpäähän on niitattu kartiomainen välikappale, joka johtaa männäntapin kautta liiat lämmöt pois männän keskiosista. Benz-moottorissa on kaksi kaasutinta. (Gersdorff ym. 1995, 36; Wallace 1920, 74, 105.)

Teoreettisessa suorituskykyvertailussa (ks. liite 1) Benz-moottorit tuottavat paljon tehoa suhteessa iskuutilavuuteensa. Esimerkiksi 195-hevosvoimainen Benz Bz.IIIb tuottaa jokaisella iskuutilavuuslitraltaan yli 14 hevosvoimaa.

4.1.4 BMW III

Heti kun Bayerische Motoren Werke AG perustettiin 1916, yritys alkoi suunnitella kuusisylinteristä rivimoottoria lentokoneisiin. Helmikuussa 1917 maineikas, kuviossa 8 näkyvä BMW III -moottori näki päivänvalon. (Gunston 1986, 24–25.)

Moottorin teräksisissä sylintereissä on hitsatut jäähdytysvesivaipat. Sylinterin halkaisija on 150 millimetriä, iskun pituus 180 millimetriä ja iskuutilavuus 19,08 litraa. Lähes kaikki tuotetut moottorit tietoisesti suunniteltiin korkealle puristus-suhteelle, yleensä 6,4:1. (Gunston 1986, 24–25.)



KUVIO 8. BMW IIIa -moottori (Flugmotor BMW IIIa: Wassergekühlter 6-Zylinder-Reihenmotor von 1917. n.d.)

BMW IIIa on erinomainen korkealentomoottori, joka on suunniteltu toimimaan tehokkaasti yli 2000 metrin korkeudella. Jos moottoria käytettäisiin täydellä teholla merenpinnan korkeudella, se räjähtäisi. Moottori kestää täyttä tehoa vasta yli 2000 metrin korkeudessa ja tämän takia kaasu avautuu vaiheittain, kun lentokone nousee korkeammalle. Yleensä lentäjällä on kolme kaasuhanaa, joista yksi on täysillä lentoonlähtöä varten ja kaksi muuta aukenevat hitaasti sen jälkeen. (Gunston 1986, 25.)

BMW IIIa -moottorilla varustettua Fokker D.VIIF -hävittäjää pidetään jopa koko sodan parhaana hävittäjänä. Se oli nousunopeus- ja korkeuslentosuoritusarvoiltaan voittamaton. BMW-moottorilla varustettu Fokker D.VIIF nousi 5000 metrin korkeuteen 14 minuutissa, kun Mercedes D.III:lla varustettu Fokker D.VII käytti samaan aikaan 38 minuuttia. (von Gersdorff ja muut 1995, 37; Munson 2006, 129.)

Maineikas hävittäjä-ässä Ernst Udet on sanonut, että moottorin ainoa heikkous on se, että se keksittiin liian myöhään. (von Gersdorff ja muut 1995, 37.)

4.1.5 Argus

Sodan alkaessa Argus-moottorit kilpailivat Mercedes D.III -moottorin kanssa Saksan tärkeimmän moottorin tittelistä. Mercedes kuitenkin osoittautui kilvan voittajaksi.

Argus As.III -moottorin moottorinohjausjärjestelmä ja venttiilien rakenne sekä sijoittelu muistuttavat Benz-moottoria. Kaasuttimena varhaisemmissa Argus-moottoreissa on Cudell-merkkinen kaasutin ja viimeisimmissä malleissa Zenith-merkkinen. (Schwager 1918, 111.)

Sodan aikana Argus-moottoreita valmistettiin Argus As.I -mallista Argus As.III:een. 1918 As.III -moottoria paranneltiin ja parannellussa mallissa, Argus As. IIIa:ssa, on jopa neljä venttiiliä sylinteriä kohden ja hieman kasvanut iskutilavuus. (von Gersdorff ja muut 1995, 37.)

4.1.6 Beardmore

120 ja 160 hevosvoiman Beardmore-moottorit ovat Austro-Daimler-moottorin lisenssikopioita. Beardmoressa on kuitenkin useita eroavaisuuksia Austro-Daimleriin nähden. Beardmoressa on muun muassa kaksi sytytystulppaa sylinteriä kohden ja kaksi kaasutinta. (Gunston 1986, 21–22.)

Beardmore-moottoreissa sylinterin pako- ja imuventtiili toimivat samalla työntötangolla, jota kannen alapuolinen nokka-akseli liikuttaa. Keinuvipu, joka avaa ja sulkee venttiilit, avaa pakoventtiilin ollessaan etukenossa ja imuventtiilin ollessaan takakenossa. Moottoreiden yleisin ongelma on juuri näiden kei-
nuvipujen murtuminen. (Wallace 1920, 114–115; McCudden 1997, 42.)

Vuodesta 1914 vuoteen 1917 Beardmore-moottoreita valmistettiin muutamia tuhansia. 1915 Beardmore kehitti 160 hevosvoimaisen moottorinsa muuttamalla sylinterin halkaisijaa 143 millimetriin, jolloin moottorin iskutilavuudeksi tuli 16,4 litraa. Moottorin valmistushinta kasvoi 825 £:sta 1045 £:aan. Luotet-

tavuudeltaan 160 hevosvoimainen Beardmore ei kuitenkaan yltänyt edeltäjänsä tasolle. (Gunston 1986, 21–22.)

4.2 V-moottori

4.2.1 V-moottorin toimintaperiaate

Ympärysvallat suosivat V-moottoria ensimmäisen maailmansodan lentokoneissaan. Kahdeksansylinterisessä V-moottorissa kampiakselin ja kampiakammion ei tarvitse olla pidempiä kuin nelisylinterisessäkään moottorissa. Venttiilinohjauskoneisto voi olla lähes yhtä kevyt kuin nelisylinterisessä moottorissa. V-moottori on siis paljon kevyempi kuin rivimoottori. V-moottori on lisäksi lyhyt ja melko kapeakin, joten se vaatii vain vähän tilaa. Lyhyeen kampiakseliin pitää mahtua useita kiinnityksiä, eli kaikki kiertokanget ja laakerit. (Wallace 1920, 11.)

Kahdeksansylinterisessä V-moottorissa, eli V-8-moottorissa, mäntien kiertojärjestys on sama kuin nelisylinterisessä moottorissa. Ensimmäinen ja neljäs mäntä ovat yläkuolokohdassa, kun toinen ja kolmas mäntä ovat alakuolokohdassaan. Tämä järjestys toimii erinomaisesti, koska tahdit tasapainottavat toisiaan eikä paljoa ylimääräisiä voimia pääse syntymään. (Wallace 1920, 60.)

Myös sodanaikaisissa V-moottoreissa on kaksi magneetta ja jokaista sylinteriä kohden on kaksi sytytystulppaa. Öljypumppua pyörittää jokaisessa käsiteltävässä V-moottorissa kampiakselilta pyörimisliikkeensä saava hammaspyörä.

4.2.2 Hispano-Suiza 8

Ensimmäinen Hispano-Suiza Type 8A valmistettiin marraskuussa 1914. Type 8A on vesijäähdytteinen V-8, jonka sylinterin halkaisija on 120 millimetriä ja iskun pituus 130 millimetriä, iskutilavuus 11,76 litraa. Type A:n paino on 202

kilogrammaa ja se tuottaa 150 hevosvoimaa 1400 kierroksella minuutissa. (Gunston 1986, 75; Lehto 1924, 3.)

Hispano-Suiza Type 8A oli tuotannossa olleista moottoreista lupaavin vuonna 1915. Hispano-Suizan vahvuuksia ovat sen lyhyys, pieni koko ja keveys. Sillä on pienempi ilmanvastuskerroin kuin pyörivillä tähtimoottoreilla. (Gunston 1986, 76.)

Hispano-Suiza 8 -moottoreissa sylinterilohkot ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden ja ne ovat lämpökäsitelty huokoisiksi. Alumiinivalusta valmistettujen sylinterien sisään on kiinnitetty koneistetut, päältä suljetut teräsvaipat, joiden kanteen venttiilit kiinnitetään. (Lehto 1924, 2, 13; Gunston 1986, 5.)

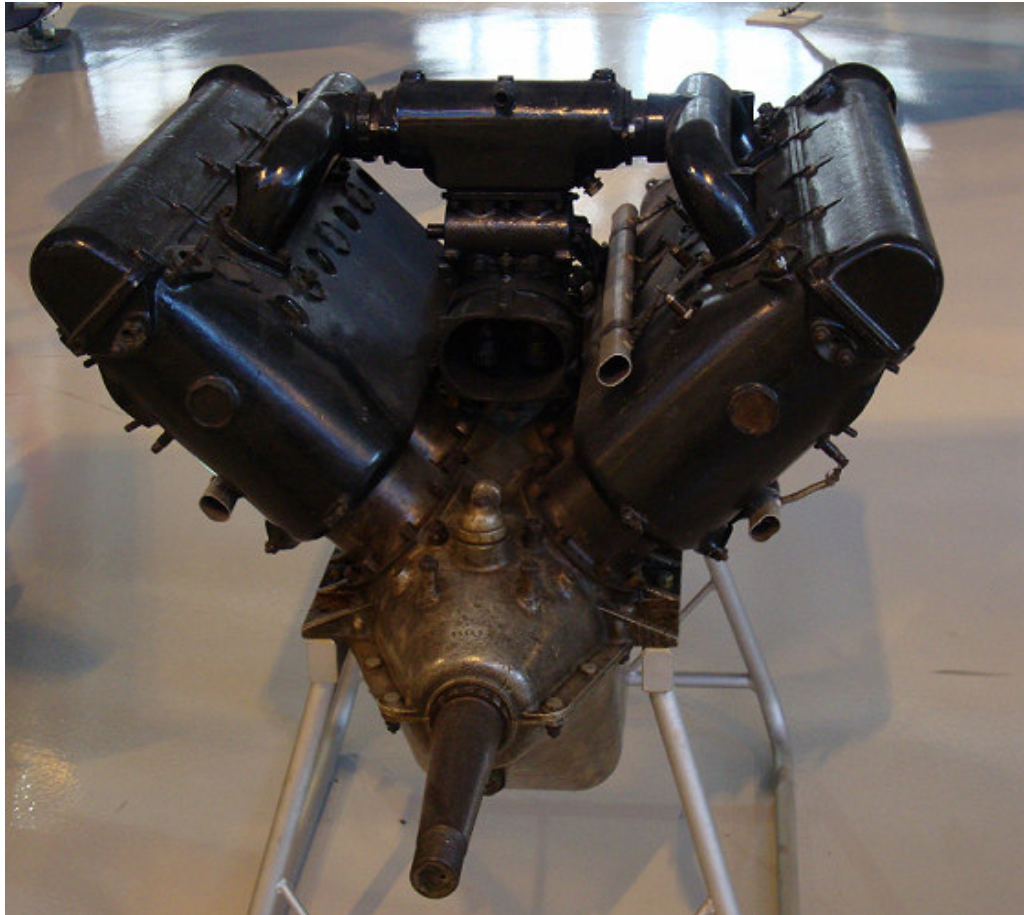
Kampiakselissa on neljä kampea 180 asteen kulmassa. Akseli on kiinnitetty neljään valkometallilla sisustettuun liukulaakeriin ja yhteen kuulalaakeriin. Moottorissa käytetään liukulaakereilla pyöriviä kaksihaaraisia kiertokankia, eli samaan kampiakselin kampeen on kiinnitetty kaksi kiertokankea. (Lehto 1924, 2, 13; Gunston 1986, 75–76.)

Venttiilit ovat sylinterien yläpuolella ja niitä liikuttaa yksi nokka-akseli kussakin sylinterilohkossa (kuvio 2, s. 7). Nokka-akselit pyörivät kampiakselin pyörittämällä kartiohammaspyörillä. Moottorin käynnistys on sangen helppoa. (Lehto 1924, 3, 5; Gunston 1986, 75.)

Hispano-Suiza 8 -moottorin voitelujärjestelmässä öljypumppu puristaa öljyn suodattimen läpi keskuskokoojaan, josta öljy kulkee putkien kautta laakeria kiertävään kanavaan. Kampiakseli on aina täynnä paineenalaista öljyä ja tämä öljy poistuu kammentappien reikien kautta voitelemaan kiertokankien päitä. (Lehto 1924, 4.)

Öljy saapuu nokka-akselin laakeriin ja sen tunkeutuu onton akselin sisälle. Öljyvirta kulkee akselin sisällä ja ruiskuaa akselissa olevista aukoista voitelemaan laakerit. Venttiililevyjen pienet reiät voitelevat venttiiliohjaimet. (Lehto 1924, 4.)

Kaasuttimena Hispano-Suiza -moottorissa on joko Claudel- tai Zenith- kaasutin. Kaasutin on lohkojen välissä ja siitä haarautuu putket molemmille sylinterilohkoille, kuten kuvioista 9 nähdään. Kaasuttimesta voidaan käsin säätää polttoaineen menekkiä eri lentokorkeuksille sopivaksi. (Lehto 1924, 4-5; Gunston 1986, 75.)



KUVIO 9. Hispano-Suiza 8Ab -moottori

Vesi kiertää moottorissa keskipakoispumpulla, joka sijaitsee öljypumpun pidennyksellä tai kampiakselin päässä. Pumpun virtaus on suunnilleen 100 litraa 1400 kierroksella minuutissa. Jäähdytysjärjestelmässä tulevan ja lähtevän veden lämpötilaero on noin 10 astetta. (Lehto 1924, 5, 14.)

Ilmapumppu sijaitsee sylinterilohkon kannessa ja sen mäntää liikuttaa nokka-akselin kampilevy. Tämän ansiosta voidaan käyttää painebensiinisäiliötä. Paineensäätöventtiiliä säätää levyn päällä olevan jousen jännitys. (Lehto 1924, 5.)

Hispano-Suiza-tyyppinen lentokonepolttomoottori on yleisesti hyvin korkealaatuinen – yksi sodan parhaista moottoreista! Hyvin huollettuna se pystyy tarjoamaan tasokasta ja luotettavaa suorituskykyä. Heikkouksia moottorissa ovat sen huono sylinterien jäähdytys, ohuiden pakoventtiilien vääntyminen ja lukuisat ongelmat vaihteistossa, mm. vinohampaisten hammaspyörien epätasainen lämpökäsittely ja kampiakselin heikko väsymiskestävyys. (Gunston 1986, 76.)

Tuotantoversio Hispano-Suiza Type A:n polttoaineenkulutus on noin 230 grammaa hevosvoimatuntia kohden. Öljyä kuluu 1450 kierroksella minuutissa noin 2,8 litraa joka tunti. (Gunston 1986, 76; Pagé 1929, 84.7)

Joulukuussa 1915 tuotannossa ollut, hieman edeltäjästään paranneltu versio Hispano-Suiza 8Aa tuotti jo 175 hevosvoimaa 1700 kierroksella. 8Aa-moottorissa puristussuhdetta oli hieman lisätty. Tätä seurasi pian Hispano Suiza 8Ab, joka tuotti 200–205 hevosvoimaa 2000 kierroksella minuutissa. (Gunston 1986, 76; Lehto 1924, 13.)

Hispano-Suiza Be tuottaa 215 hevosvoimaa 2150 kierroksella minuutissa. 8Ba 1916 tuottaa tehokkaan hammaspyörävälityksen ansiosta jopa 220 hevosvoimaa. Myös 300 hevosvoimaisia Hispano-Suiza-moottoreita valmistettiin sodan loppupuolella, mutta tehokkaampia moottoreita käytettiin lähinnä pommikoneissa. (Gunston 1986, 76; Lehto 1924, 13.)

Vuosina 1915–1918 valmistettiin 12593 kappaletta 150–180 hevosvoiman Hispano-Suiza-moottoreita, 28977 kappaletta 200–220 hevosvoiman moottoreita ja 8323 kappaletta 300 hevosvoiman moottoreita. (Gunston 1986, 76.)

Teoreettisessa suorituskykytarkastelussa Hispano-Suizat ovat vahvoilla (ks. liite 1). Hispano-Suiza-moottorit tuottavat paljon tehoa iskutilavuuteensa näh-

den. 200 hevosvoimainen Hispano-Suiza, jonka iskutilavuus on 11,75 litraa, tuottaa huikeat 17 hevosvoimaa jokaisella iskutilavuuslitraltaan. Suorituskykytarkastelussa ainoastaan sodan loppupuolen Rolls-Royce-moottoreilla on tässä suhteessa paremmat suoritusarvot.

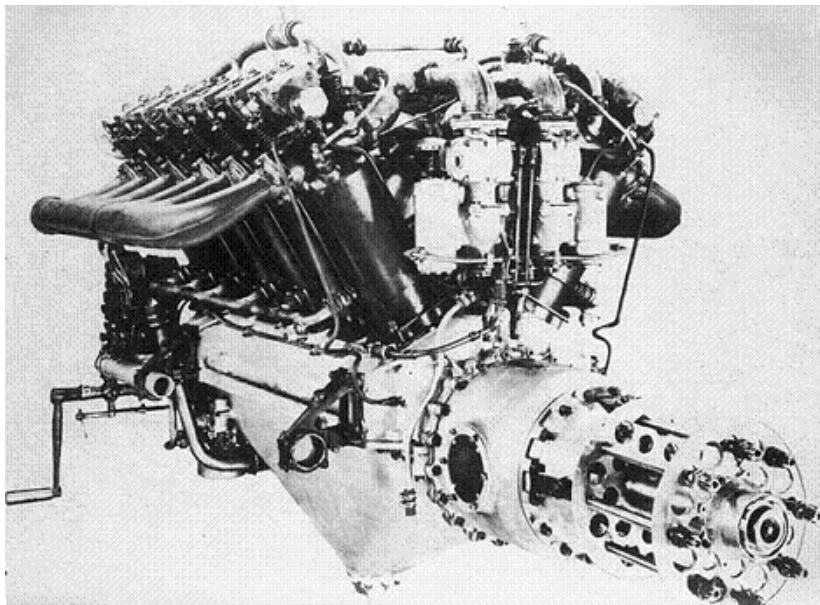
4.2.3 Rolls-Royce Eagle & Falcon

Rolls-Roycen 12-sylinteristä V-moottori Eagle -prototyyppiä alettiin koeajaa maaliskuussa 1915. Moottorissa on terässylinterit ja kampikammio on alumiinivalua. Imu- ja pakosarjat ovat terästä. Sylinterien yläpuolisia venttiilejä ohjaa yksi alapuolinen nokka-akseli. (Gunston 1986, 132.)

Eagle I -moottorissa on kaksi Claudel Hobson -kaasutinta, yksi kullekin sylinterilohkolle. Eagle I ja IV -malleja lukuun ottamatta kaikissa muissa Eagle-malleissa on neljä kaasutinta, jotka on sijoitettu siten, että tulipaloriski on mahdollisimman pieni. Lentäjä pystyy säätämään polttoaineen syöttöä lentokorkeuden muuttuessa. (Gunston 1986, 132, Jane's Fighting Aircraft of World War I, s. 313.)

Sylinteriryhmät ovat 60 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Jokaisessa kampiakselin kammessa on kaksi kiertokankea. Moottorin sylinterien ympärille on hitsattu teräksiset jäähdytysvesivaipat. Moottorissa on poikkeuksellisesti planetaarinen alennusvaihteisto, josta ei aiheudu kovin suurta räsitusta kampiakselin laakereille. (Gunston 1986, 132, Jane's Fighting Aircraft of World War I, s. 313.)

Rolls-Royce Falcon noudattaa Eaglen rakennetta, mutta on kooltaan ja iskutilavuudeltaan hieman pienempi. Falconin tehot nousivat sotavuosien saatossa Mk.I:n 190 hevosvoimasta Mk.III:n 275 hevosvoimaan. Eaglen teho nousi 225 hevosvoimasta vuoden 1917 maaliskuuhun mennessä Eagle VIII -moottorissa jopa 375 hevosvoimaan. Vakuuttava 350–375 hevosvoiman Eagle VIII painaa 384 kilogrammaa ja moottori nähdään kuviossa 10. (Gunston 1986, 132.)



KUVIO 10. Rolls-Royce Eagle VIII -moottori (Rolls-Royce Enthusiasts' Club: Sir Henry Royce. n.d.)

Rolls-Roycen moottorit ovat nauttineet korkeaa arvostusta jo heti alusta pitäen. Ne ovat luotettavia ja hyvin viimeisteltyjä lentokonemoottoreita. Rolls-Royce Eagle olikin Iso-Britannian johtava moottori heti sodan jälkeen. Kesällä 1919 ensimmäinen lentokone, joka lensi Atlantin yli ilman välilaskuja, käytti moottorinaan Rolls-Royce Eaglea. (Gunston 1986, 132; Virtanen 2011.)

Kunnioitetut Rolls-Royce-moottorit niittävät kunniaa myös teoreettisessa suorituskykyvertailussa (ks. liite 1). Rolls-Roycet ovat melko ylivoimaisesti parhaita hävittäjämoottoreita sekä paino-tehoarvoltaan että teho-iskutilavuusarvoltaan.

Rolls-Royce Falcon Mk.III tuottaa 275 hevosvoimaa painaessaan vain 286 kilogrammaa. Painon suhde tehoon on siis 1,04 kilogrammaa yhtä hevosvoimaa kohti. Rolls-Royce Eagle VIII -moottorin vastaava arvo on 1,1 kilogrammaa yhtä hevosvoimaa kohden.

14,2-litraisen Falcon Mk.III -moottorin jokainen iskuilavuuslitra tuottaa 19,37 hevosvoimaa. 20,2-litrainen Eagle VIII tuottaa 17,33 hevosvoimaa jokaisella

iskutilavuuslitrallaan. Muut moottorit, 200 hevosvoimaista Hispano-Suizaa lukuun ottamatta, jäävät tässäkin suhteessa kauas taakse.

4.2.4 RAF 4

Vuodesta 1916 lähtien valmistettu RAF 4 -moottori on 12-sylinterinen ilmajäähdytteinen V-moottori, jossa sylinteriryhmät ovat 60 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Ilmajäähdytteisissä V-moottoreissa jäähdyttävä ilma johdetaan sylintereille ilmanohjauslevyin. (Gunston 1986, 151; Mäkelä 1930, 91.)

RAF 4:n iskutilavuus on 13,2 litraa, puristussuhde 4,5:1 ja se tuottaa 90 hevosvoimaa. Moottorissa on kaksi kaasutinta. (Gunston 1986, 151.)

Kehitellyssä versiossa, RAF 4A:ssa, moottorin paino on 289 kilogrammaa ja teho jo 160 hevosvoimaa. Vuonna 1917 syntyi RAF 4D, jossa on pitkällisen kehittelyn ja kokeilun tuloksena alumiinivalusylinterit. RAF 4D:n puristussuhde on 4,7:1 ja se tuottaa 240 hevosvoimaa 304 kilogramman painoisena. (Gunston 1986, 151–152.)

4.2.5 Wolseley Viper & Python

Sodan aikaan moottoripula oli kova ja monet tehtaat valmistivat kopiomoottoreita tunnetummista malleista. Wolseley W.4A Python on hieman raskaampi kopio Hispano-Suizasta.

Wolseley Pythonista kehitetyssä 200 hevosvoimaisessa W.4A Viperissä on suurempi puristussuhde 5.3, kun Pythonissa puristussuhde on 4.8. Vieläkin kehittyneemmässä W.4B Adderissa on tasapainotettu kampiakseli ja alennusvaihteisto. (Gunston 1986, 76.)

Erään Wolseley-moottorierän kampiakselit olivat murheenkryyni kesällä 1917. Ne eivät kestäneet käytössä neljää tuntia pidempään, joten insinöörit joutuivat palaamaan suunnittelupöydälle. On kuitenkin muistettava, että yleisesti His-

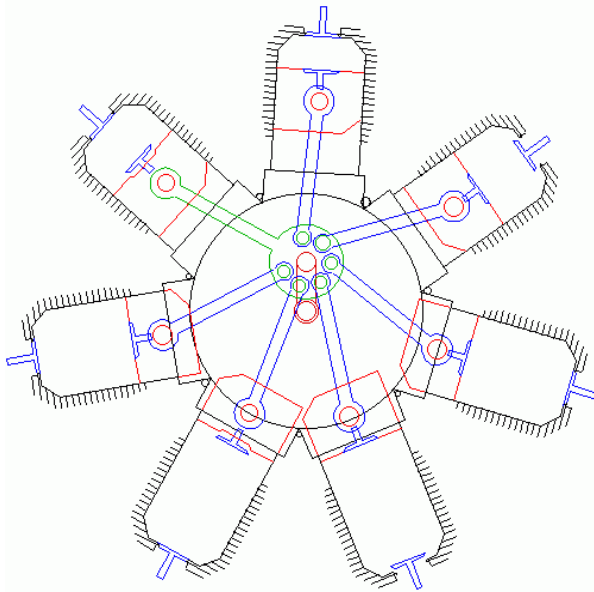
pano-Suiza-moottorit kopioineen ovat erinomaisia lentomoottoreita. (Gunston 1986, 76.)

4.3 Pyörivä tähtimoottori

4.3.1 Pyörivän tähtimoottorin toimintaperiaate

Pyörivät tähtimoottorit ovat toimintatekniikaltaan erilaisia kuin rivi- ja V-moottorit. Pyörivissä tähtimoottoreissa kampiakseli pysyy paikallaan ja kampikammio sylintereineen pyörii sen ympäri. Potkuri pyörii myös moottorin mukana.

Moottori pyörii keskellä olevan kampiakselin ympäri. Kampiakselin kaula, jossa kiertokanget ovat kiinni, on hieman tätä moottorin keskipistettä ylempänä. Moottori ja kiertokanget pyörivät siis eri keskipisteiden ympäri, kuten kuviosta 11 nähdään.



KUVIO 11. Pyörivän tähtimoottorin kampikoneisto: Gnome Monosoupape (Gnome Rotary Engine. n.d.)

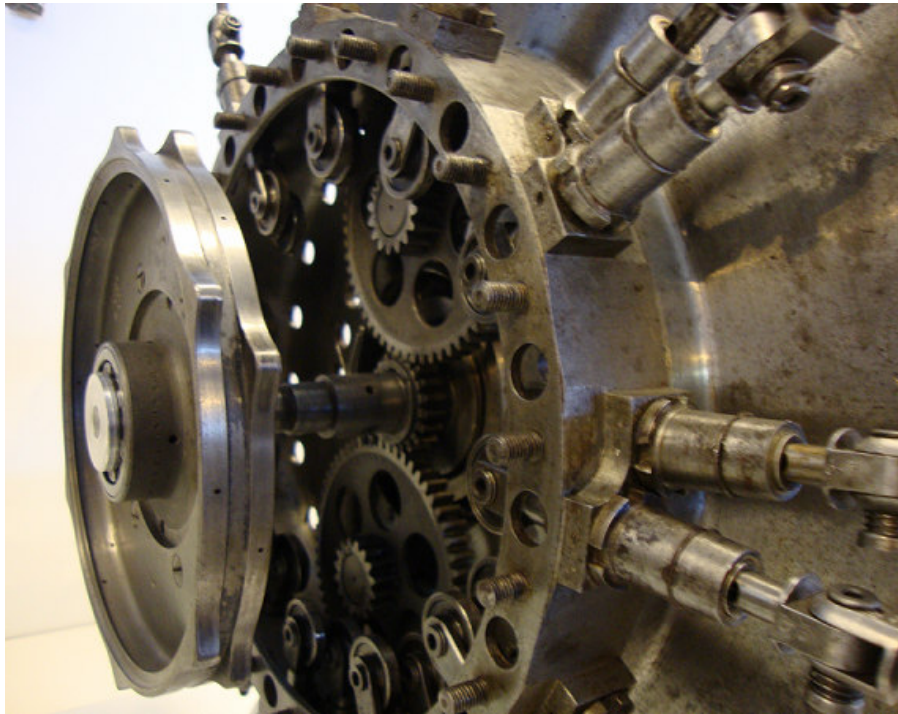
Pyörivässä tähtimoottorissa on pariton määrä sylinterejä, koska moottori sytyttää joka toisen kampiakselin ylle tulevan sylinterin. Näin ollen jokainen sylinteri pääsee syttymään vuorollaan. Sylinterien syttymisjärjestys on 9-sylinterisessä pyörivässä tähtimoottorissa: 1, 3, 5, 7, 9, 2, 4, 6, 8.

Moottorin pyörintä aiheuttaa hyrrävoiman, jolloin koko lentokone pyrkii liikkumaan hyrrävoiman mukaisesti. Kun kevyissä hävittäjissä oli tehokas pyörivä tähtimoottori, tämä vaikutus vahvistui. James McCudden (1997, 74) huomauttaa, että hävittäjälentäjät käyttivät tätä sivuttaisvoimaa hyödykseen ja pystyivät kaartamaan toiseen suuntaan huomattavasti nopeammin kuin muilla moottorityypeillä varustetut lentokoneet.

Kun kampiakseli pidetään paikallaan ja annetaan sylinterien ja kampikammion pyöriä sen ympäri, saadaan aikaan iso vauhtipyörä ilman lisäpainoa. Pyörivän tähtimoottorin etuja ovat sen keveys ja lyhyys pituussuunnassa. Jokainen sylinteri saa tehokkaan ja keskenään samanlaisen ilmajäähdytyksen, koska sylinterit eivät ole toistensa takana. Vahvuuksia ovat väännön tasaisuus ja erinomainen tasapaino. (Pagé 1929, 830–831; Wallace 1920, 13)

Heikkouksiksi luetaan suurempi polttoaineen- ja öljynkulutus sekä pyörinnästä aiheutuva tehoa kuluttava ilmanvastus, jonka suuruuden on arvioitu olevan noin 16 hevosvoimaa. Lyhyillä suurta nopeutta vaativilla lennoilla pyörivä tähtimoottori on parhaimmillaan. (Pagé 1929, 830–831; Wallace 1920, 13, 77–78.)

Venttiilinohjauskoneisto toimii nokka-akselin asemesta nokkalevyn avulla. Levyllä on nokat, jotka käyttävät työntötankoja. Pyörivän tähtimoottorin venttiilinohjauskoneisto havainnollistuu kuvion 12 kautta. Huomioitakoon, että kuviossa 12 nokkalevyt on vedetty hieman ulos moottorista. (Virtanen, 2011.)



KUVIO 12. Pyörivän tähtimootorin venttiilinohjauskoneisto: Siemens-Halske Sh.III

Pyörivät tähtimootorit ovat ilmajäähdytteisiä ja ne käyvät hyvin kuumina: sylinterilämpö voi olla noin 160–180 celsiusastetta, kun vesijäähdytteisissä moottoreissa se on noin 80–90 celsiusastetta. Varsinaista pakoputkea ei ole, vaan pakokaasut ohjataan lentokoneen rungon alle. (Pagé 1929, 1028; Havimo 2011.)

Pyörivien tähtimootoreiden voitelussa käytetään yleensä risiiniöljyä, koska sen ominaisuudet eivät muutu, vaikka moottorin sisässä olisi hieman bensiinihöyryjä. (Gunston 1986, 90.)

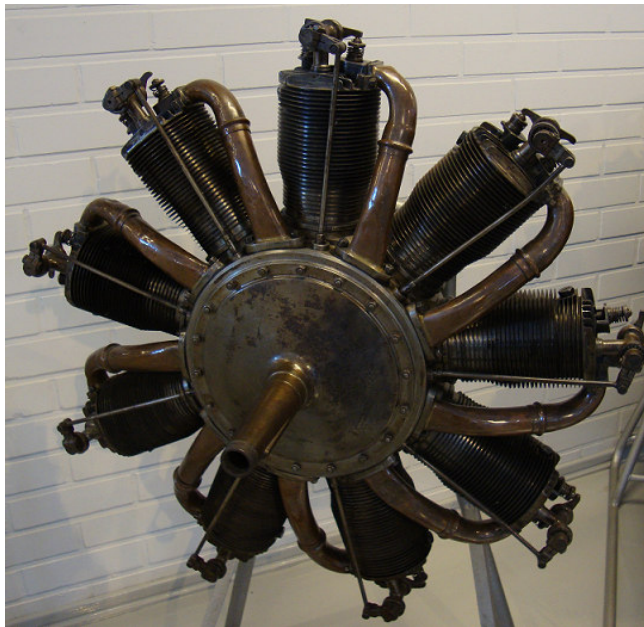
Nämä moottorit kuluttavat huomattavasti enemmän öljyä (jopa 40-100g / hevosvoimatunti) ja polttoainetta kuin muut moottorityypit. Pyörivässä tähtimoottorissa ei ole öljypohjaa, joten siinä ei saada öljyä talteen. Moottori toimii siis tuoreöljyvoitelulla, vaikka se on nelitahtinen. Suuri määrä risiiniöljyä häviää pakoputken kautta moottorin pyöriessä. Tästä syystä moottorilla on sotkuista

lentää ja lentäjä tuntee palaneen risiiniöljyn tuoksun hyvin. (Müller 1918, 4; Havimo 2011.)

Pyörivässä tähtimoottorissa jokainen koneenosa on valmistettu koneistamalla, jotta liikkuvien osien välille syntyy erinomainen tasapaino. Materiaalina käytettiin vahvan vetolujuuden omaavia terässeoksia, kuten krominikkeli-terästä. Myös messinkiä on käytetty pyörivissä tähtimoottoreissa laajalti.

4.3.2 Le Rhône

Yhdeksänsylinterinen, 80-hevosvoimainen Le Rhône 9C (kuvio 13), jonka sylinterin halkaisija on 105 millimetriä ja iskun pituus 140 millimetriä, tuottaa 93 hevosvoimaa 1200 kierroksella minuutissa. Moottori kuluttaa polttoainetta noin 25 litraa tunnissa. Öljyä Le Rhône kuluttaa 3,7 litraa tunnissa. Le Rhône'n paino on vain 109 kilogrammaa. (Gunston 1986, 90; Le Rhône, 4.)



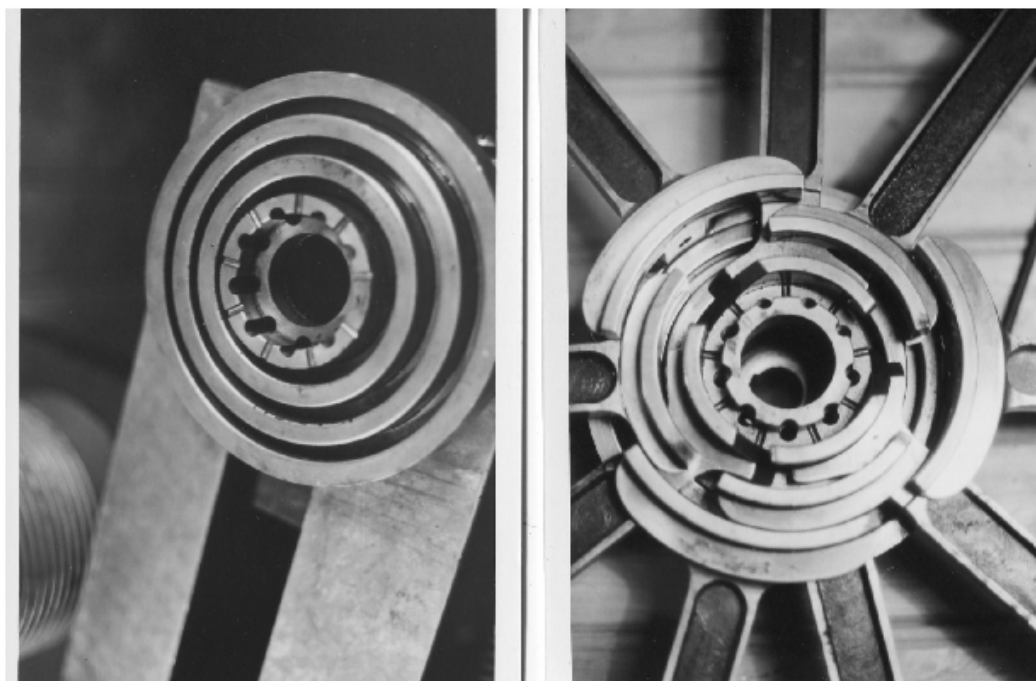
KUVIO 13. Le Rhône 9C 80hv -moottori

Moottorin kiinteään osan muodostavat kampiakseli ja sen takana oleva levy, johon on kiinnitetty magneetto ja öljypumppu. Kiinteään osaan kuuluu vielä

kampiakselin takaosassa sijaitseva kaasutin. Kaasuuntunut seos kulkee onton kampiakselin läpi kampikammioon, josta se johtuu putkia pitkin imuventtiilille. (Le Rhône, 5-6.)

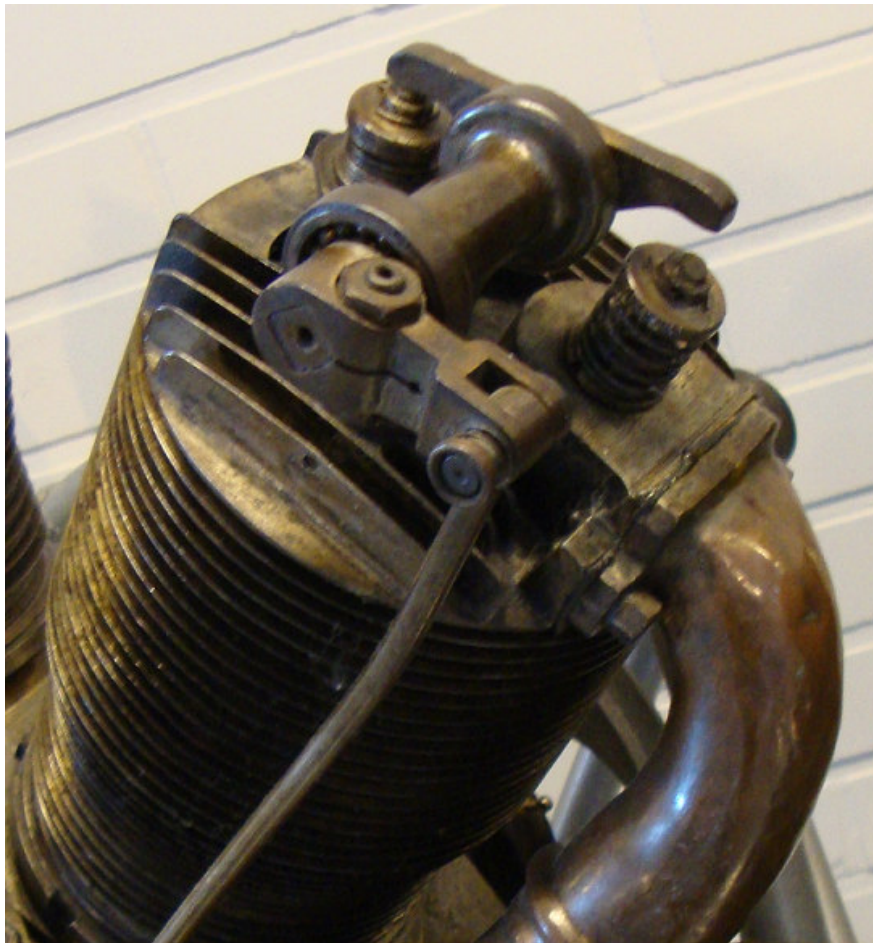
Moottorin pyörivään osaan kuuluvat muun muassa kampikammio ja sylinterit. Takorausylinterit on kiinnitetty kampikammioon kiertein ja ruuvein. Imu- ja pakoventtiilit sijaitsevat sylinterien kannessa ja ne pysyvät paikoillaan heikko-voimaisilla jousilla; käytännössä venttiilit sulkeutuvat keskipakovoiman ansiosta. (Le Rhône, 5-6; Gunston 1986, 90.)

Pyörivään osaan kuuluvat lisäksi kiertokanget ja männät. Kiertokanget vaikuttavat kampiin kahden laipan muodostaman rummun välityksellä. Rumpu on laakeroitu kampiin kahdella kuulalaakerilla. Laippojen sisäpinnalla on kolme pronssilla sisustettua sorvattua uraa. Kiertokankien päät on tarkasti sorvattu näihin uriin sopiviksi. Jokaisella uralla pyörii kolme kiertokankea. Tämä asetus näkyy kuviossa 14. Kuviossa vasemmalla oleva uritettu kappale on vastakkappale oikealla olevalle. (Le Rhône, 6; Pagé 1929, 833; Gunston 1986, 90.)



KUVIO 14. Le Rhône'n kiertokankien kiinnitysarat (Virtanen, P. 2011)

Venttiilivipuja ohjaa kaksi nokkalevyä: toinen levy ohjaa imuventtiilejä ja toinen pakoventtiilejä. Molempia venttiilivipuja käyttää sama työntötanko, kuten kuvista 15 nähdään. Vivut saavat vuorottelevan liikkeensä imu- ja pakopuolen rullien liukumisesta nokkalevyllä. Keskipakoisvoima, joka vaikuttaa tankoon, pyrkii painamaan imupuolen rullaa nokkalevyn pintaa vasten. Nokat on kiinnitetty pulteilla nokkalevyyn ja ne pyörivät epäkeskotapin ympäri kahden kuulalaakerin laakeroimina. (Le Rhône, 7; Pagé 1929, 831.)



KUVIO 15. Le Rhône'n sylinterinkansi

Kampikammion napalevyssä on pulteilla kiinnitetty 45-hampainen hammaspyörä, joka vaikuttaa hammaskehään. Hammaskehässä on sisäpuolinen 50-hampainen hammastus ja se on jyrssitty nokkakehään. (Le Rhône, 7)

Magneetto sijaitsee takalevyssä. Magneeton akselissa on 16-hampainen hammaspyörä ja se saa liikkeensä 36-hampaiselta hammaspyörältä, joka pyörii kampikammion mukana. Magneeton katkaisija määrää saman sytytyshetken kaikille sylintereille. Johtosäie johtaa virran jakohiileen moottorin runkoon. Jakohiili liukuu kampikammion jakolevyä pitkin. (Le Rhône, 8.)

Öljypumpun akselilla on hammaspyörä, jota liikuttaa kampikammion kanssa pyörivä välityshammaspyörä. Säädetty jousi painaa pumpun heilahtelevan sylinterin menoputken pintaa vasten. Putken yläosassa olevan tulpan avulla voitelujärjestelmä voidaan ilmata. (Le Rhône, 8.)

Öljypumpusta öljy kulkee kampiakselin läpi kammentappiin ja epäkeskotappiin. Täältä ensimmäinen voiteluaukko voitelee kannatuslaakerit. Voiteluputki johtaa öljyn sylinterien sisäseinille ja toinen putki voitelee nokat ja rullat. Kolmas voiteluputki johtaa öljyn kiertokangille, viides voitelee ohjauslaitteiden keskuselimet ja kuudes etunavan laakerit. Voitelussa käytetään pyöriville tähtimoottoreille ominaista risiiniöljyä. (Le Rhône, 9.)

Pumpun iskuluku on verrannollinen moottorin kierroslukuun: mitä enemmän kierroksia, sitä useammin öljypumpun mäntä iskee. Moottorin kiertäessä 250 kierrosta minuutissa öljypumppu iskee 9 kertaa; 1222 kierroksella minuutissa pumppu iskee 44 kertaa. Voiteluverkossa on myös öljymittari, jonka sisällä oleva ilma puristuu männän jokaisesta iskusta. (Le Rhône, 9.)

Le Rhôneissa käytetään Bloc-Tube-merkkistä kaasutinta. Kaasuttimen pääosan muodostaa suorakaiteenmuotoinen laatikko, jossa luistikappale liikkuu. Luisti on pyöreän aukon yläpuolella ja tästä on mahdollista säätää kaasuttimeen tulevan ilman määrää. Luistin päässä on neula, joka on jousen välityksellä riippuvainen luistin liikkeistä. Neula liikkuu suulakkeessa säädellen bensiinin tuloa. Puhdasta ilmaa kaasuttimeen tuovat kaksi alumiiniputkea, jotka myös johtavat liekit ulos, mikäli kaasuttimessa syttyisi tuli. Polttoaine-ilmaseos virtaa sylintereihin kupariputken läpi. (Le Rhône, 18–19, Gunston 1986, 90.)

Suodattimella varustettu neulaventtiili puhdistaa bensiinin ennen kuin se saapuu kaasuttimeen. Säätäsiivilä voidaan avata tai sulkea jousen välityksellä liikkuvan neulan avulla. Bensiinin tuloa voidaan siis säätää muuttamalla bensiinintuloaukon kokoa. Ohjaajalla on kaksi asteikolla liikkuvaa vipua, joista toinen säätää samanaikaisesti luistia ja sen neulaa, toinen säätäsiivilän toimintaa. (Le Rhône, 19.)

80 hevosvoimaista Le Rhône 9C -moottoria ja sen parannettua 110 hevosvoiman Le Rhône 9J -moottoria arvostettiin sodan aikana paljon. Sodanaikaiset kokemukset moottorista ovat hyvin positiivisia, vaikka Le Rhôneillekin, kuten kaikille muillekin moottoreille, sattui joskus vakavia häiriöitä. (McCudden 1997, 105, 112.)

4.3.3 Gnome Monosoupape

Gnome Monosoupape on pääpiirteissään samankaltainen moottori kuin Le Rhône. Muun muassa öljypumpun kotelo on tehty alumiinista. Gnome Monosoupapessa on vähemmän rakenneosia kuin missään muussa senaikaisessa moottorissa, jossa on yhtä monta sylinteriä. (Pagé 1929, 815; Wallace 1920, 76.)

Monosoupape on ranskaa ja tarkoittaa yksiventtiilistä. Moottorin sylinterin päällä onkin vain pakoventtiili. Moottorissa ei ole varsinaista kaasutinta, vaan polttoaine-ilmaseos kulkee painemittarin ja venttiilin avulla. Rikas seos kulkeutuu ontton kampiakselin läpi ja sieltä sylinteriin kampikammion pienten aukkojen kautta. (Pagé 1929, 824, 827.)

Pakoventtiili pysyy imutahdin aikana hetken auki ja päästää ilmaa sylinteriin. Kaasuventtiiliä ei ole, joten jokainen sylinteri saa saman verran ilmaa, jos ilmanpaine säilyy muuttumattomana. Tehoa voi säätää muuttamalla polttoaineensyöttöä ainoastaan hyvin pienissä rajoissa. (Pagé 1929, 824, 827.)

Koska moottorin koneistaminen oli niin tarkkaa ja laatua tarkkailtiin paljon, Ranskan teollisuus otti käyttöön Monosoupapen ansiosta monia uusia kone-tekniisiä standardeja. Kiertokangista yksi on pääkiertokanki ja muut kiertokanget ovat kiinni siinä. Monosoupapen kampiakseli on kaksiosainen. (Wallace 1920, 185; Pagé 1929, 824–825.)

Gnome Monosoupape -moottorit ovat melko epäluotettavia moottoreita ja niissä ilmenee useita pikkuvikoja. Sytytystulpat saattavat aiheuttaa ennen aikaista syttymistä lämmitessään ja pakoventtiilit nokeentuivat voimakkaasti (Munson 2006, 100). McCuddenin (1997, 14, 53) mukaan juuri sodan kynnyksellä Kuninkaallisten lentojoukkojen mekaanikkojen päätehtävä oli raapia nokea Gnomen pakoventtiileistä.

Gnome-moottorista saattoi lennon aikana irrota kokonainen sylinterikin. Muun muassa Nieuport 28 -hävittäjä on muilta ominaisuuksiltaan erinomainen, mutta sen ikävin ominaisuus oli perin pohjin epäluotettava 150-hevosvoimainen Gnome Monosoupape 9 N -moottori. (Munson 2006, 100, 153.)

100-hevosvoimainen Gnome Monosoupape 9 Type B-2 kuluttaa polttoainetta 38 litraa tunnissa ja kuluttaa öljyä 7,6 litraa tunnissa. Kulutukseltaankin se on paljon Le Rhônea jäljessä. (Gunston 1986, 90.)

4.3.4 Oberursel

80-hevosvoimainen Oberursel U.0 ja 100-hevosvoimainen U.I ovat kopioita Gnome Monosoupape -moottorista. Kehittyneempi malli, Oberursel UR.II, on kopio Le Rhône 9J -moottorista. 160 hevosvoimaisissa Oberursel U.III ja UR.III -moottoreissa on kaksi 80 hevosvoiman moottoria peräkkäin. (Schwager 1918, 115.)

Teoreettisessa tarkastelussa kevyet Oberursel-moottorit saavat sodanaikaisista moottoreista parhaat paino-iskutilavuusarvot (liite 1). Kaksirivinen Oberursel

UR.IIIa on iskutilavuudeltaan 18,4-litrainen ja painaa 170 kilogrammaa. Jokainen iskutilavuuslitra painaa moottorissa siis noin 9,2 kilogrammaa.

Oberursel U.I ja UR.II -moottoreissa jokainen iskutilavuuslitra painaa vain noin 8,9 kilogrammaa. Myös painon suhde tehoon -arvo Oberursel UR.II ja UR.III -moottoreissa erinomainen: 1,17 kilogrammaa hevosvoimaa kohden (ks. liite 1). (Dechamps & Kutzbach 1921, 195.)

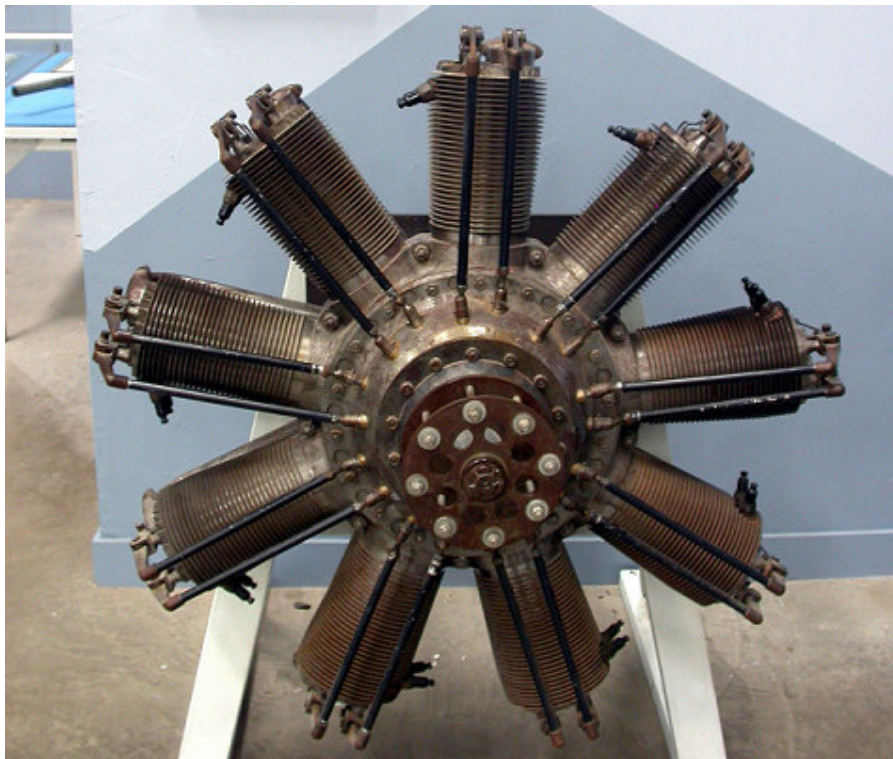
Toisaalta Oberurselin moottoreiden teho suhteessa iskutilavuuteen ei ole sodanaikaisten moottoreiden parhaimmistoa. Varhainen U.I-moottori tuottaa 100 hevosvoimaa ja on iskutilavuudeltaan 16,3-litrainen. Tällöin jokainen iskutilavuuslitra tuottaa vain 6,1 hevosvoimaa. Myöhäisemmillä UR.II ja UR.III -moottoreilla jokainen iskutilavuuslitra tuottaa hieman yli 7,5 hevosvoimaa.

4.3.5 Clerget 9

Clerget on hyvin samanlainen kuin Le Rhône ja Gnome Monosoupape. 9 Z -moottorissa puristussuhde on 4.36:1 ja 9 B -moottorissa 4.56:1. Lämpökäsittelyjen krominikkeliteräs-kiertokankien rakenne on samanlainen kuin Gnomessa, eli pääkiertokankeen on kiinnitetty loput kiertokanget. Myös kampiakseli on kaksiosainen Gnomen tapaan. Kiertokangissa, kampiakselin ja pyörivän kamppikammion välissä on kuulalaakerit. (Pagé 1929, 838–839; Manual of Clerget aero-motors, 11, 49.)

Clergetin sylinterit ovat kuin Gnomessa, mutta Clergetissä on sylinterin päällä kaksi venttiiliä ja kaksi sytytystulppaa. Clerget-moottoreissa imu- ja pakoventtiilit toimivat omilla työntötangoillaan, kuten kuviosta 16 nähdään. (Manual of Clerget aero-motors, 11, 43, 49.)

Kampiakselin takapuoliseen osaan on kiinnitetty kaasutin. Alkujaan männät olivat valurautaa, mutta sittemmin alumiinin esiinmarssin myötä alumiinimännät otettiin käyttöön myös Clergeteissä. (Manual of Clerget aero-motors, 11, 43, 49.)



KUVIO 16. Clerget 9 B -moottori (Charette, M. 2007)

Clerget 9 Z -moottorissa ilmenneet ongelmat männän ja kiertokangen liitoksissa sekä niissä ilmenevät voiteluviat oli korjattava 9 B -moottoriin. 9 B -moottorin mäntään lisättiin männäntapin vahvikkeet. Vahvikkeiksi lisättiin kaksi fosforipronssista valmistettua holkkia männäntapin reikiin. Kiertokankeen lisättiin vahva kiinnike männäntappia varten. (Manual of Clerget aero-motors, 44; Gunston 1986, 41.)

Moottoreiden sylintereihin asennetut, sylinterien jäähdytystä tehostavat mes-sinkiset renkaat eivät poistaneet ylikuumenemisongelmia, vaan paikoin jopa pahensivat niitä. (Gunston 1986, 41.)

Polttoaineen syöttö tapahtuu kuten Le Rhône:ssa. Ainoat Clerget-moottoreihin käyvät kaasuttimet ovat neulaventtiili-mallisia, joilla ei kuitenkaan saavuteta kovin tehokasta kaasutusta. Clergetin kaasutinta voi pitää venttiilinä, jolla polt-

toaine-ilmaseosta voidaan säädellä ja kaasuläpän kokoa vaihtaa. Yleisin Clergetin kaasutin on alumiinirunkoinen A.D-kaasutin. (Manual of Clerget aero-motors, 12.)

Polttoainetta 9 Z kuluttaa 61,34 litraa tunnissa ja 9 B 63,15 litraa tunnissa; Öljyä Clerget 9 Z kuluttaa 9,08 litraa tunnissa, kun 9 B kuluttaa 10,12 litraa tunnissa (Manual of Clerget aero-motors, 12). Gunston (1986, 41) kirjoittaa, että Clerget 9 B hinnoiteltiin Britanniassa 907,5 £ arvoiseksi. Näin ollen se on huomattavasti kallein pyörivä tähtimoottori.

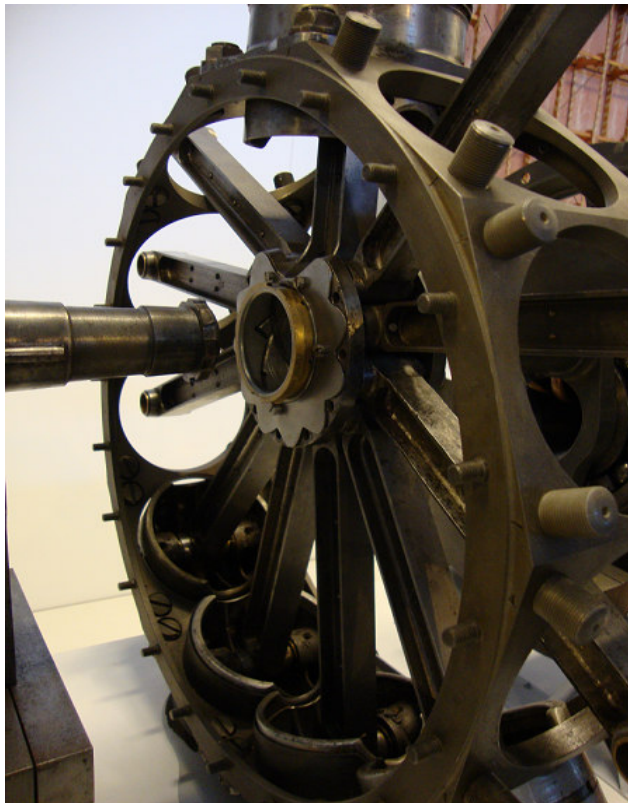
4.3.6 Siemens-Halske

Yksitoistasyylinterisen 160 hevosvoimaisen Siemens Sh.III sylinterin halkaisija on 120 millimetriä ja iskun pituus 140 millimetriä. Puristussuhteena on 5,1:1. Moottori on ylipuristettu korkeusmoottori ja sen verrattain hitaasta pyörimisestä aiheutuva ilmanvastuskerroin on paljon pienempi kuin muissa samanaikaisissa pyörivissä tähtimoottoreissa. Siemens-Halske Sh.III pyörii vain 900 kierrosta minuutissa. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 1-2.)

Siemens-Halske Sh. III -moottorissa kampiakseli on useimpien pyörivien tähtimoottorien tapaan kaksiosainen. Tässä moottorissa kuitenkin myös kampiakseli pyörii ja tämän pyörimisen aiheuttamia voimia on tasapainotettu vastapainoilla. Vastapainot on kiinnitetty ruuveilla kampiakselin varsiin. Kampiakseli on laakeroitu vaihdekehukseen, kampikammion etu- ja takakansiin kuulalaakereihin. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 8.)

Moottori on rakennettu kehykselle, jossa sijaitsevat paikallaan olevien akselien ympäri pyörivät vaihdekartiopyörät. Kampiakseli on kiinnitetty kuulalaakereihin moottorin takapäähän ja kampikammioon. Kampikammion takapää on laakeroitu vahvalla kaksoiskuulalaakerilla ja kampikammio on laakeroitu myös vaihdekehuksen sisäpuolelle. Kaikki käyttölaitteet, kuten kaasutin, magneetit ja öljypumppu ovat vaihdekehuksen takapuolella. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 4.)

Kampikammio, joka näkyy kuviossa 17, muodostuu sylinterien lukua vastaavasta 11-kulmaisesta renkaasta sekä etummaisesta ja takimmaisesta kannesta. Nämä osat, niin kuin myös ohjaukammion osat, on valmistettu korkealuokkaisesta taotusta teräksestä. Kammio rengas on tehty höyläämällä, sorvaamalla ja poraamalla. Sylinterit kiinnitetään renkaaseen neljällä pultilla. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 5-6.)

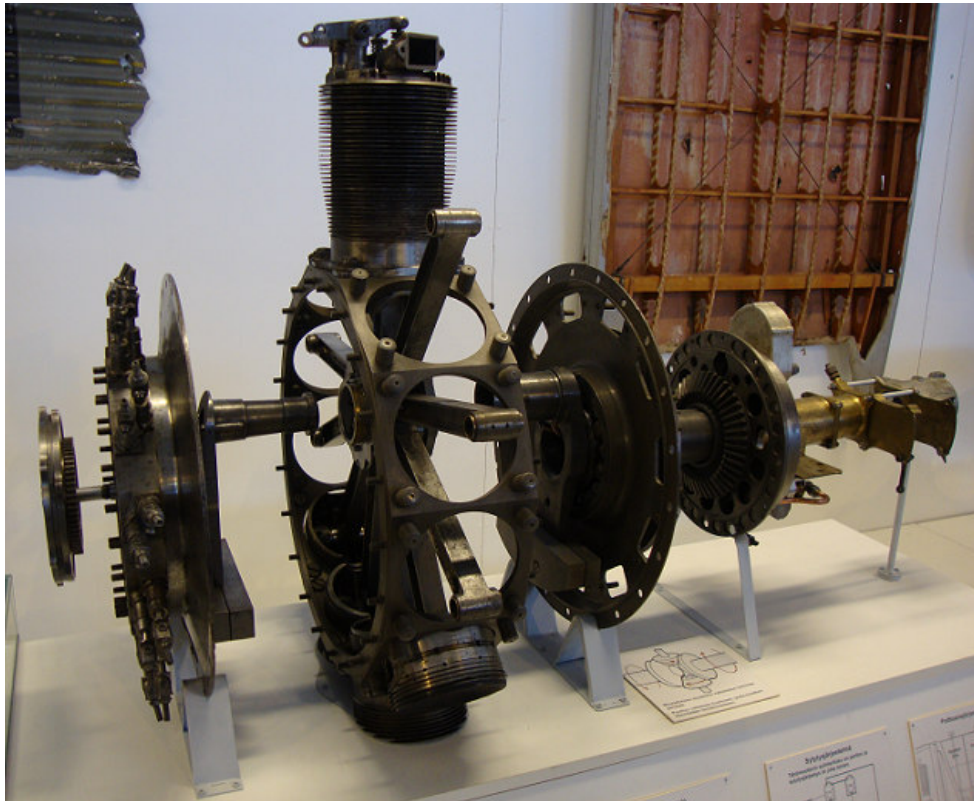


KUVIO 17. Siemens-Halske Sh.III:n kammio rengas ja kiertokanget

Ohjaukammion etukansi jatkuu kartionmalliseksi potkurintapiksi. Tämän kannen alla on napa, johon on kiinnitetty kuulalaakeri kampiakselin etummaisesta laakeritapista lähtevän nokkalevyn juoksutapin tueksi. Vaihdekartiopyörät sijaitsevat vaihdekehyksessä. Vaihdekehynksen takakantena on kojekansi, jossa ohjauslaitteet ovat kiinni. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 6-7.)

Kampiakselin takapäässä ja kampikammion kannessa on kartiohammaspyörät. Kampiakselin takapää pyörittää pientä otsapyörää, joka ohjaa öljypumpua, magneettoja ja konekivääritahdistinta. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 8.)

Moottorissa on yksi pääkiertokanki ja siihen on kiinnitetty muut sivukiertokanget, kuten monissa muissakin pyörivissä tähtimoottoreissa. Männät ovat alumiinivalusta. Sylinterit ovat sorvattu taotusta teräksestä. Kokonaiskuva moottorin osista on esitetty kuviossa 18. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 10–11.)



KUVIO 18. Siemens-Halske Sh.III osina

Kaasutin on samanlainen kuin Le Rhônessa, mutta se on mitoitettu Siemens-Halsken suurempaa tehoa vastaavaksi. Suutinneula on lisäksi sellainen, että moottoria voidaan kuristaa säätämällä kaasunkuristusvipua ilman, että tarvitsee koskea bensiininsäätäjään. Bensiininsäätäjää tarvitsee käyttää vain, kun muutetaan polttoaine-ilmaseos vastaamaan senhetkistä lentokorkeutta. Moot-

torissa on kaksi magneetta, mutta vain yksi sytytystulppa sylinteriä kohden. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 12.)

Bensiiniä Sh.III kuluttaa 45kg tunnissa ja öljyä 11–13 kg tunnissa. Moottori painaa 194kg. (Siemens 160 hv. Pyörivä moottori, 1.)

4.3.7 Bentley BR. 1

Bentley BR.1 on suunniteltu Clerget 9 -moottorin pohjalta. Bentleyyn moottori on halvempi valmistaa kuin Clerget ja se on tehokkaampi suurennnetun iskupi-tuuden ansiosta. Männät ja sylinterit ovat alumiiniseoksesta. Sylinterien sisällä on valurautakuoret. (Gunston 1986, 22.)

Moottorin sanotaan olevan ensimmäinen ilmajäähdytteinen moottori, jossa käytettiin alumiinisia sylinterejä. Moottori kehitettiin vuonna 1915 ja sen hinnan on laskettu olleen noin 880 £ per moottori. (Gunston 1986, 22.)

Bentley BR. 1 on hyvin luotettava moottori: 150 hevosvoimaa 1250 kierroksel-la minuutissa ilman käynnin heikkenemistä yli 100 tunnin ajan! Moottorin paino on 180kg. Bentley BR.2 -moottoriin iskuilavuutta kasvatettiin. (Gunston 1986, 22.)

5 POLTTOMOOTTORIEN KEHITTYMINEN ENSIMMÄI-SEN MAAILMANSODAN AIKANA

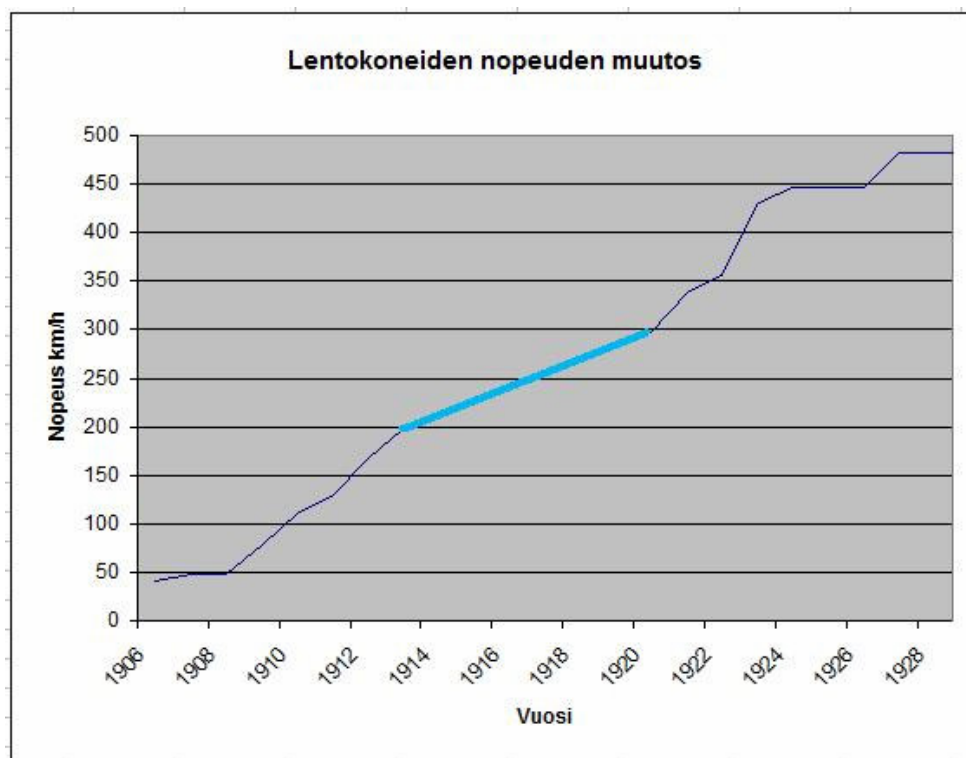
5.1 Kehittymisen tarkastelua

Missään löytämässäni lähteessä ei ole suuremmin tarkasteltu ensimmäisen maailmansodan hävittäjämoottoreiden kehittymistä sodan aikana. Lähteitä tulkitsemalla päätin, millä saroilla kehitys on ollut huomattavinta. Myös ke-hittymistä arvioidessani olen joutunut olemaan tarkkana, sillä jotkut sodanai-kaiset lähteet ovat ilmeisen puolueellisia. Viisi mielestäni huomattavinta kehi-

tysaluetta on esitelty alla. Näiden jälkeen olen pohtinut moottorien suorituskykyä teoreettisen suorituskykyvertailun muodossa.

5.2 Perustekniikan kehittyminen

Ensimmäisen maailmansodan hävittäjälentokoneissa käytetyt polttomoottorit kehittyivät paljon sodan aikana. Lentokoneiden nopeuden kehittymistä kuvaa hyvin kuvio 19. Kehitystä syntyi, kun moottoreita piti valmistaa yhä suurempia määriä ja suorituskykyä tuli yrittää koko ajan kasvattaa. Voitaisiin jopa sanoa, että keskusvaltojen ja ympärysvaltojen suunnittelijat sekä insinöörit olivat keskenään sodassa – sodassa, jossa paremman lentokoneen suunnitellut pääsee niskan päälle.



KUVIO 19. Lentokoneiden lentonopeuden muutos 1900-luvun alussa (Pagé 1929, 29, muokattu)

Tekniikan kehittymistä edelsi moottorisuunnittelijoiden loistokas uutteruus, jota kuvaa hyvin Rolls-Roycellä käytössä ollut filosofia: ”Koettele sitä, kunnes se menee rikki, mieti, mikä meni vikaan ja parantele tätä kohtaa” (Gunston 1986, 132). Myös saksalaisilla insinööreillä oli samankaltainen ohjenuora, lause suoraan Isosta Kirjasta: ”Koetelkaa kaikkea ja pitäkää se, mikä on hyvää” (Dechamps & Kutzbach 1921, 237, 250). Pudotettuja viholliskoneita tutkimalla saatiin myös arvokasta tietoa vihollisen uusimmista teknisistä saavutuksista (McCudden 1997, 46).

Sodan alkuaikojen teknisiä sovelluksia alettiin kyseenalaistaa ja kehitettiin parempia keinoja ajamaan samat asiat. Pienistä parannuksista kasvoi suuri parannusten virta! Esimerkkinä mainittakoon Clerget 9 -moottorin männäntäpin vahvikkeet. Myös alennusvaihteistojen suunnittelussa esiintyneet lapsentaudit vähenivät sodan aikana huomattavasti.

James McCudden (1997, 17) toteaa, että 1913 Kuninkaallisilla lentojoukoilla oli ongelmia saada lentokoneet pysymään ilmassa yli tunnin kerrallaan, koska erinäiset pikkuviat vaivasivat muun muassa Gnome-moottoria. Sodan loppupuolella kuitenkin hävittäjien käytännöllinen toiminta-aika oli helposti yli kolme tuntia.

5.3 Painon väheneminen ja tehon kasvu

Moottoreiden paino väheni sodan aikana huomattavasti. Tätä edesauttoi Dechampsin ja Kutzbachin (1921, 237, 241–242) mukaan uusien materiaalien, lyhyempien iskupituuksien ja nopeampien mäntänopeuksien käyttö sylinterien koon kasvattamisen asemesta. Hyvän lämmönjohtokyvyn omaavan alumiinin käytöllä voitiin myös optimoida moottorin jäähdytysjärjestelmää kevyemmäksi.

Laihemman polttoaineseoksella, korkeammalla puristussuhteella ja mekaanista kitkaa vähentämällä saavutetaan huomattavasti pienempi polttoainenkulutus, jolloin tarve suurille ja painaville polttoainemäärille katoaa.

Sodan aikana hävittäjissä käytettyjen moottorien suorituskyky kasvoi alle sadasta hevosvoimasta jopa yli kolmeensataan hevosvoimaan (ks. liite 1). Suurimpia yksittäisiä tekijöitä tähän tehon kasvuun on palotilan pieneneminen ja puristussuhteen kasvu. Myös moottoreiden perustekniikan kehittyminen vaikutti tehon kasvamiseen: mekaanisia häviöitä ja muita tehoa rajoittavia tekijöitä saatiin vähennettyä huomattavissa määrin.

5.4 Alumiinin käyttö

Alumiini on materiaalina hyvin kevyttä verrattuna rautaan ja teräkseen. Vasta sodan aikana alettiin yleisesti käyttää alumiiniseoksista valmistettuja mäntiä lentomoottoreissa. Yleensä alumiinimännässä käytetyssä seoksessa on myös suuri määrä kuparia. Alumiinimännät painavat vain kolmasosan valurautamäntien painosta ja niiden hankausvastus on lähes puolet pienempi. (Wallace 1920, 157; Mäkelä 1930, 56.)

Kevyiden alumiinimäntien käytön myötä saatiin nostettua moottorin kiertonopeutta kuitenkin liikaa kiertokankia, kampiakselia ja laakereita rasittamatta. Alumiinin pehmeys kuitenkin rajoittaa sen käyttökohteita; materiaalin korkea hinta suhteessa rautaan rajoitti myös hieman alumiinin käyttöä. (Pagé 1929, 694; Wallace 1920, 157.)

Alumiinin käyttöä moottoreissa karsastettiin aluksi, koska sillä on matala sulamispiste. Pagén (1929, 694–695) mukaan alumiini johtaa lämpöä huomattavasti tehokkaammin kuin esimerkiksi valurauta: alumiinimäntiä käyttämällä männät pysyvät jopa 150 astetta viileämpinä kuin valurautamännät. Korkean lämmönjohtokyvyn ansiosta moottorin puristussuhdetta voitiin huoletta kasvattaa.

Alumiinia on helppo koneistaa eikä se kulu kovin nopeasti, jos voitelu toimii. Alumiinimännän heikkous on sen tuplasti voimakkaampi lämpölaajeneminen

valurautaan verrattuna (Pagé 1929, 706). Kovilla kuormilla mäntä siis voi laajeta liikaa ja leikata kiinni sylinteriin.

5.5 Korkealentomoottorit

Ensimmäisen maailmansodan ilmasodankäynnissä lentokoneen käytännöllinen lakikorkeus oli hyvin tärkeä asia. Korkeammalla lentävä hävittäjälentokone oli aina etulyöntiasemassa.

Viimeistään sodan aikana ymmärrettiin, että korkealla lennettäessä moottorin teho heikkenee, koska ilman tiheys pienenee. Moottori tuottaa noin 6000 metrin korkeudessa vain noin puolet siitä tehosta, jonka se tuottaa merenpinnan tasalla. Tällöin moottorin tehoon vaikuttaa ensisijaisesti se, missä paineessa ilma-polttoaineseos syttyy palotilassa. Tähän vaikuttavat puristussuhde ja sylinterissä olevan ilman paine.

Puristussuhdetta ei voitu sodan aikana vielä muuttaa kesken lennon, joten se piti säätää korkealla lentämistä varten jo maassa. Puristussuhdetta kasvattamalla saadaan paremmat tehot korkealla lennettäessä, jossa niitä eniten tarvitaan. Jos merenpinnan korkeudella ottaa korkealentomoottorista kaikki tehot irti, se hajoo. Korkealentomoottorit on siis rakennettu ylipuristetuiksi. (Wallace 1920, 233; Mäkelä 1930, 49.)

Kun lentokone lentää korkeammalle, myös moottorin kaasutusjärjestelmä häiriintyy, koska polttoaine-ilmaseoksesta tulee rikkaampaa. Tällöin moottorin polttoaineenkulutus kasvaa tehon pysyessä samana ja moottori ylikuumenee. Helpoin ratkaisu tähän ongelmaan on eräissä sodan aikana kehitetyissä kaasuttimissa oleva sulkuläppä, jolla voidaan säätää ilman tuloa kaasuttimeen (Pagé 1929, 332).

Korkealentokaasutin on säädetty antamaan oikea polttoaine-ilmaseos korkealla ilmassa ja matalalla lennettäessä lentäjän on itse säädettävä kaasuttimen läpän avulla seossuhdetta. Kaikkein edistyneisimmissä kaasuttimissa, muun

muassa Zenith-mallisessa, oli läppä, joka aukeni itsestään ilmanpaineen muuttuessa (Pagé 1929, 332).

Kesällä 1917 keskivertohävittäjä kiipesi 3000 metriin noin 14 minuutissa. Alkuvuonna 1918 3000 metriin päästiin jo noin kymmenessä minuutissa. Kesällä 1918 Fokker D.VII nousi 5000 metriin 14 minuutissa. (McCudden 1997, 126, 183; Munson 2006, 129.)

5.6 Tähtimoottorin synty

Sodanaikaiset kokemukset lentokonemoottoreista antoivat kipinän suunnittelijoille suunnitella pyörimätön tähtimoottori lentokoneisiin. Tähtimoottorissa kampiakseli pyörii ja moottori pysyy paikallaan. Myöhemmin tähtimoottori on osoittautunut erittäin hyväksi lentokonemoottoriksi.

Ensimmäisiä tähtimoottoreita oli mm. Le Rhônesta muunneltu Super Rhône. Super Rhône kuluttaa huomattavasti vähemmän öljyä ja polttoainetta kuin edeltäjänsä. Teho, joka pyörivässä tähtimoottorissa kuluu pyörimisliikkeen aikaansaamiseen, siirtyy tähtimoottorissa suoraan kampiakselille. Varhaisissa ilmajäähdytteisissä tähtimoottoreissa sylinterien jäähdytys oli vaikein kynnyskysymys. (Pagé 1929, 1028.)

Vuonna 1917 kehiteltiin eräs ensimmäisistä tähtimoottoreista, ABC Dragonfly, joka pantiin sarjatuotantoon ilman kattavaa testausta. Dragonfly tuotti 45 hevosvoimaa vähemmän kuin lupasi ja oli noin 25 kiloa painavampi. Moottorin sylinterit kuumenivat niin paljon, että Dragonflyt jouduttiin vetämään takaisin tuotannosta. Sylintereissä oli käytetty kuparilevyjä jäähdytyksen edistämiseksi, mutta lämmön piti ensin kulkea teräksen läpi, ennen kuin se pääsi kuparilevyille asti. (Dahl 2011, 72.)

Ensimmäinen kunnan tähtimoottori oli Cosmoksen vuonna 1918 valmistama Jupiter. Lokakuussa 1918 se tuotti 395 hevosvoimaa 300 kilogramman painoi-

sena (Gunston 1986, 43). Tähtimoottorit olivat sodan aikana kuitenkin vasta prototyyppiasteella eikä niitä käytetty taistelukentillä.

5.7 Teoreettinen suorituskykyvertailu

Liitteessä 1 on esitelty ensimmäisen maailmansodan hävittäjälentokoneissa käytettyjen moottorimallien teoreettisia suorituskykyarvoja. Moottorit on järjestetty valmistusvuotensa mukaan. Suorituskyvyn mittareiksi olen valinnut painon suhteen iskuilavuuteen, painon suhteen tuotettuun tehoon ja tehon suhteessa iskuilavuuteen. Taulukossa on ilmoitettu moottorien kuivapainot, eli paino ilman polttoainetta, öljyä ja jäähdytysnesteitä. Tämä ilmoitustapa syrjii hieman pyöriviä tähtimoottoreita ja muita ilmajäähdytteisiä moottoreita.

Paino suhteessa moottorin iskuilavuuteen kertoo, kuinka monta kilogrammaa kukin moottorin iskuilavuuslitra painaa. Tällä arvolla arvioidaan moottorin potentiaalista paino-tehosuhdetta.

Painon suhde moottorin tuottamaan tehoon ilmoittaa, kuinka monta kilogrammaa moottori painaa jokaista tuotettua hevosvoimaa kohti. Tämä suhde kertoo, kuinka hyvin teholtaan optimoidusta moottorista on karsittu ylimääräinen paino pois.

Tehon suhde iskuilavuuteen -arvo kuvaa, kuinka monta hevosvoimaa jokainen moottorin iskuilavuuslitra tuottaa. Arvolla tarkastellaan sitä, miten hyvin moottorin iskuilavuudesta on osattu ottaa tehoja irti. Suuresta sylinterien iskuilavuudesta seuraa lisäpainoa ja muun muassa polttoaineenkulutus kasvaa.

Painon suhde iskuilavuuteen -arvo on paras pyörivillä tähtimoottoreilla, koska ne ovat ylivoimaisesti kevyimpiä moottoreita. Koska lähes kaikkien lentomoottoreiden iskuilavuus oli suuren sodan aikana 10 ja 20 litran välillä, painon suhde iskuilavuuteen -mittari erottelee painavat moottorit kevyistä. Tätä suhdetta on mielenkiintoista verrata muihin liitteessä esitettyihin suorituskyvyn mittareihin.

Kun moottorilla on hyvä painon suhde iskuilavuuteen -arvo, helposti oletetaan, että se korreloi samassa suhteessa moottorin paino-tehoarvoon. Näin ei kuitenkaan ole. Pyörivät tähtimoottorit tuottavat niin paljon vähemmän hevosvoimia muihin moottorityyppeihin nähden, että painon suhde tehoon -arvossa useimmat pyörivät tähtimoottorit jäävät keskikastiin. On kuitenkin nostettava esiin Oberurselin ansiokkaat pyörivät tähtimoottorit UR.IIa ja UR.IIIa, jotka sijoittuvat kolmen parhaan joukkoon sekä painon suhteessa iskuilavuuteen että tehoon -arvoissa.

Painon suhde tehoon -arvoa tarkasteltaessa huomataan, että moottorityyppistä parhaiten pärjäävät V-moottorit. Kuten olen edellä todistanut, V-moottorit ovat todella tehokkaita suhteessa painoonsa. Huomionarvoista on myös se, että parhaat arvot tässä mittarissa saaneet Rolls-Royce-moottorit ovat painon suhde iskuilavuuteen arvoiltaan vertailun heikoimpia moottoreita.

Viimeinen suorituskyvyn mittari ei ota huomioon moottorin painoa. Tehon suhde iskuilavuuteen -arvot ovat jälleen parhaita V-moottoreilla. Tämä suorituskyvyn mittari selittää sen, miksi Rolls-Royceillä on huono painon suhde iskuilavuuteen -arvo, mutta loistava paino-tehosuhde. Rolls-Roycen moottorit ovat painavia ja erittäin tehokkaita: jokainen iskuilavuuslitra tuottaa huomattavan paljon hevosvoimia.

Samaten Oberursel-moottorit, jotka pärjäsivät painon huomioon ottavissa mittareissa hyvin, jäävät tehoon suhde iskuilavuuteen -arvoiltaan muiden pyörivien tähtimoottoreiden tavoin keskiarvon alapuolelle.

Teoreettisen suorituskykyvertailun perusteella tekisi mieli julistaa Rolls-Roycet sodan parhaimmiksi hävittäjälentomoottoreiksi. Parhaan moottorin julistaminen vain tämän tarkastelun pohjalta olisi väärin. Tämä vertailu ei ottanut huomioon moniakaan kappaleessa kolme esitettyä vaatimusta lentomoottorille, mutta mielestäni tuo kuitenkin ilmi muutamia hyvälle moottorille ominaisia piirteitä.

Tyydynkin toteamaan, että sekä Rolls-Roycet että Oberursel UR.IIa ja UR.IIIa pärjäävät teoreettisessa suorituskykyvertailussa loistavasti. Rivimoottorit, etenkin muutamissa lähteissä sodan parhaaksi moottoriksi nimetty BMW IIIa, pärjäävät tässä vertailussa melko kehnosti.

6 LOPPUSANAT

Olen lukenut ensimmäisen maailmansodan ilmailusta melko paljon jo ennen tätä opinnäytetyötä. Opinnäytetyöprosessin aikana luin erittäin paljon 1910- ja 1920-luvulla kirjoitettuja mielenkiintoisia kirjoja lentokonemoottoreista. Tutkin suomalaisten julkaisujen lisäksi englannin-, saksan- ja ranskankielisiä lähteitä. Oli virkistävää palautella mieleen jo hieman ruostuneita saksan ja ranskan taitojani.

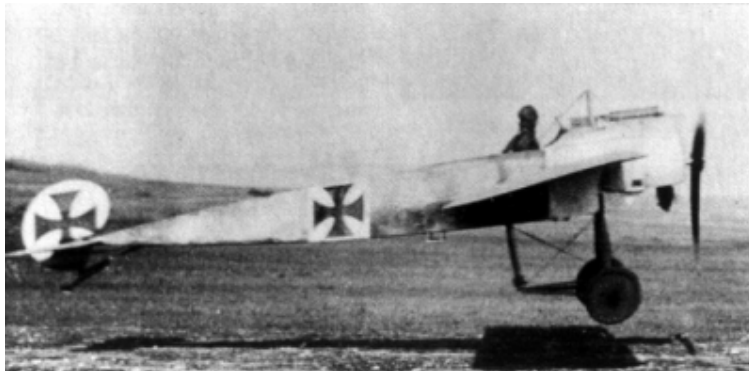
Toisinaan suomalaistenkin lähteiden ymmärtäminen oli haastavaa, koska 1920-luvulla käytettiin koneenosista hieman eri nimityksiä kuin nykyään. Ohjekirjoissa puhuttiin sytytystulppien asemesta kynttilöistä, sylintereitä kutsuttiin silintereiksi ja niin edelleen.

Koska opinnäytetyötäni vastaavaa lähdeteosta ei liene olemassa, oli jännittävää oppia, millä aloilla oikeasti tapahtui kehittymistä ensimmäisen maailmansodan moottoritekniikassa. Jouduin arvioimaan, mitkä seikat on relevanttia esittää tässä opinnäytetyössä ja millä aloilla tapahtui kehitystä. Löysin mielestäni kaikkein tärkeimmät aiheeseeni liittyvät asiat ja sain ne jäsenneltyä hyväksi kokonaisuudeksi. Kehittymisen tarkastelun lisäksi opinnäytetyöni on kattava suomenkielinen esitys ensimmäisessä maailmansodassa käytetyistä moottoreista.

Jouduin suhtautumaan kriittisesti lukemaani, koska joissain lähteissä oli väitetty täysin päinvastaista kuin toisissa lähteissä. Myös moottoreiden suorituskykyistä löytyi usein hieman heittoa lähteestä riippuen. Onneksi käytettävissäni oli sen verran kattavasti lähdekirjallisuutta, että löysin luotettavat tiedot tähän opinnäytetyöhön.

Jouduin prosessin aikana karsimaan jonkun verran kokonaisuuksia opinnäytetyöstäni, koska muuten se olisi kasvanut liikaa. Kuten ylivääpeli evp. Pertti Virtanen tokaisi: ”Jo pelkästään Le Rhône 9C -moottorista saisi opinnäytetyön!”

Suunnaton kunnioitukseni ensimmäisen maailmansodan hävittäjä-ässiä kohtaan on vain kasvanut tätä opinnäytetyötä tehdessä. Kuullessani nyt nimiä, kuten von Richthofen, Udet, Boelcke, Immelmann, Voss, McCudden ja Hawker, ymmärrän entistä paremmin, millaisissa oloissa ja millaisin laittein nuo urheat sankarit ovat joutuneet suorittamaan urotekojaan. Kuviossa 20 on vuoden 1915 ehkä paras hävittäjä, Fokker-yksitaso.



KUVIO 20. Fokker-yksitaso lähdössä lentoon luultavasti vuonna 1915 (Germany's Aces of World War I: Max Immelmann. n.d.)

Opinnäytetyöprosessi on ollut erittäin mielenkiintoinen ja antoisa. On ollut mukava yhdistää omia kiinnostuksen kohteita koulutyöhön. Voisinkin sanoa, että opinnäytetyö on ollut mielenkiintoisin kokonaisuus koko ammattikorkeakouluurallani.

Aiheenvalinnallani olen mielestäni osoittanut myös poikkeuksellista luovuutta kehittää opinnäytetyö aiheesta, joka poikkeaa melko paljon yleisistä insinööri-en opinnäytetöistä.

Olen saanut paljon apua ihmisiltä, joille olen kertonut tästä tutkielmastani. Nöyrimmät kiitokseni Keski-Suomen ilmailumuseon henkilökunnalle, Veikko Havimolle, Harri Huopaiselle, Pertti Virtaselle, opinnäytetyön ohjaajalle Jorma Matilaiselle, luokalleni TKO7S:lle, yhteisölle #ideaalikaasu, moottoritekniikan asiantuntijoille Olli ja Ville Kirijatshenkolle ja Touko Kautolle sekä kaikille muille minua avustaneille henkilöille.

Eräs opinnäytetyöhöni liittyvä oivallus syntyi ollessani juoksulenkillä eräänä kirpeänä pakkasaamuna. Kiihdyttäessäni juoksutahtiani hengitin kylmää ulkoilmaa voimakkaasti keuhkoihini ja puhalsin lämmintä hiilidioksidia ulos. Tuolla hetkellä ymmärsin, että ihminen todellakin on eräänlainen biologinen **kone**.

LÄHTEET

Aalto, A. n.d. Le Rhône. Taktillinen toimisto.

Dahl, L. 2011. ABC Dragonfly. Aeroplane-lehti, huhtikuu 2011, 72.

Airas, V. 1922. Polttomoottorit. Helsinki, Otava.

Dechamps, H. & Kutzbach, K. 1921. Prüfung, Wertung und Weiterentwicklung von Flugmotoren. Berlin W 62 Richard Carl Schmidt & Co.

Gersdorff, K. von, Grasmann, K & Schubert, H. 1995. Flugmotoren und Strahltriebwerke. Bonn, Bernard & Graefe Verlag.

Gunston, B. 1986. World Encyclopaedia of aero engines. Book Club Associates.

Havimo, V. 2011. Keski-Suomen Ilmailumuseon eläkkeelle jäänyt konservattori. Haastattelu 9.3.2011.

Hoffren, J. & Saarela, O. 2008. Lentotekniikan perusteet. Helsinki, Edita Prima Oy.

Jane's Fighting Aircraft of World War I. 1990. Studio Edns.

Lehto, E. 1924. Hispano-Suiza lentomoottorit 150hv ja 180hv. Ilmailuvoimien esikunnan koulutustoimisto.

Le Rhône. n.d. Moottorin huolto-ohjekirja. Taktillinen toimisto.

Manual of Clerget aero-motors and their installation in various aircraft. n.d. Moottorin huolto-ohjekirja.

McCudden, J. 1997. Viisi vuotta Kuninkaallisissa lentojoukoissa. Alkuperäinen painos vuodelta 1918. Helsinki, Koala-Kustannus.

Müller, K. 1918. Flugmotoren. München und Berlin, Druck und Verlag von R.Oldenbourg.

Munson, K. 2006. Ensimmäisen maailmansodan hävittäjät. Näköispainos vuonna 1969 ilmestyneestä painoksesta. Helsinki, Otava.

Mäkelä, U. 1930. Lentokonemoottorioppi. Helsinki.

Pagé, V. 1929. Modern aviation engines: volume one & two. New York, The Norman W. Henley publishing company.

Sarmi, I. 1973. Polttomoottorit. Helsinki: Kirjayhtymä.

Schwager, O. 1918. Motorenkunde für Flugzeugführer, Beobachter und Werkmeister, Teil zwei. Berlin-Charlottenburg 2.

Siemens 160 hv. n.d. Moottorin huolto-ohjekirja.

Virtanen, P. 2011. Lentokonemekaanikko, ylivääpeli evp. Haastattelu 18.3.2011.

Wallace, J. 1920. Design of aeroplane engines. London. Benn Brothers, Ltd.

Kuvalähteet

Benz Bz.IV. 2011. Benz-moottorin pienoismalliin liittyvä keskustelufoorumi. Viitattu 24.3.2011. http://www.rcuniverse.com/forum/m_10230205/tm.htm

Charette, M. 2007. Pima Air and Space Museum. Ilmailuaiheiset kotisivut. Viitattu 25.3.2011. <http://www.passion-aviation.qc.ca/pima.htm>, Clerget 9B, 1917.

Early Aviation. 2008. Albatros D.III -lentokoneen pienoismallia koskeva sivu. Viitattu 24.3.2011.

http://www.aeroscale.co.uk/modules.php?op=modload&name=SquawkBox&file=index&req=viewtopic&topic_id=126996

Flugmotor BMW IIIa: Wassergekühlter 6-Zylinder-Reihenmotor von 1917. n.d. Bredow-web. Lentokonemoottoreita esittelevä saksalainen internet-sivu. Viitattu 25.3.2011. http://www.bredow-web.de/Triebwerke_und_Flugzeugmotore/Flugmotor_BMW_III/flugmotor_bmw_iii.html

Germany's Aces of World War I: Max Immelman. n.d. Ensimmäisen maailmansodan hävittäjä-ässiä esittelevä internet-sivu. Viitattu 25.3.2011.

<http://www.squidoo.com/maximmelman>

Gnome Rotary Engine. n.d. Animated Engines. Internet-sivu, jossa on koneiden toimintaperiaatteita selvitetään animoidusti. Viitattu 16.4.2011.

<http://www.animatedengines.com/gnome.shtml>

How a 4 Stroke Engine Works. n.d. Internet-sivu, joka esittelee nelitahtimoottorin toimintatapaa. Viitattu 24.3.2011.

<http://www.whitedoglubes.com/4strokeengines.htm>

Mercedes D.III Aviation Engine. 2008. Mercedes D.III -moottoria esittelevä internet-sivu. Viitattu 24.3.2011. <http://www.idflieg.com/mercedes-diii.htm>

Nieuport 28. n.d. Nieuport 28 –aiheinen internetsivu.
<http://www.airminded.net/n28/n28.html>, Gnome Monosoupape Ignition.

Rolls-Royce Enthusiasts' Club: Sir Henry Royce. n.d. Rolls-Roycesta kertova internet-sivusto. Viitattu 24.3.2011.

http://www.rrec.org.uk/History/People/Frederick_Henry_Royce/Royce_The_Designer_by_I_Evernden.php

Virtanen, P. 2011. Henkilökohtainen valokuva-arkisto.

LIITTEET

Liite 1. Lentokonemoottoreiden teoreettinen suorituskykyvertailu

Liitteessä on taulukoita moottoreiden teoreettiset suorituskykyarvot. Kolme parhaita suorituskykyarvoa on lihavoitu. Moottorin tuottaman tehon määrä vaihtelee hieman sen mukaan, millä kierrosluvulla teho on mitattu. Olen käyttänyt taulukossa yleisimmin esiintyviä tehoarvoja.

| Moottorimalli | Valmistusvuosi | Tyyppi | Paino (kg) | Teho (hv) | Iskutilavuus (l) | Paino/iskutilavuusarvo (kg/l) | Paino/tehoarvo kg/hv | Teho/iskutilavuusarvo (hv/l) |
|---------------------------|----------------|--------------|------------|-----------|------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Le Rhône 9 C 80hv | 1913 | Pyörivä | 109 | 85 | 10,9 | 10,00 | 1,28 | 7,80 |
| Clerget 9 Z | 1913 | Pyörivä | 168 | 110 | 15,3 | 10,98 | 1,53 | 7,19 |
| Benz Bz. III | 1914 | Rivimoottori | 270 | 150 | 14,3 | 18,88 | 1,80 | 10,49 |
| Mercedes D.III | 1914 | Rivimoottori | 265 | 160 | 14,8 | 17,91 | 1,66 | 10,81 |
| Gnome Monosoupape 100hv | 1914 | Pyörivä | 136 | 100 | 12,8 | 10,63 | 1,36 | 7,81 |
| Le Rhône 9 J 110hv | 1914 | Pyörivä | 145 | 112 | 15,1 | 9,60 | 1,29 | 7,42 |
| Benz Bz.IV | 1915 | Rivimoottori | 370 | 200 | 18,8 | 19,68 | 1,85 | 10,64 |
| Oberursel U.I | 1915 | Pyörivä | 145 | 100 | 16,3 | 8,90 | 1,45 | 6,13 |
| Clerget 9 B | 1915 | Pyörivä | 167 | 130 | 16,29 | 10,25 | 1,28 | 7,98 |
| Bentley BR.1 | 1915 | Pyörivä | 222 | 150 | 17,3 | 12,83 | 1,48 | 8,67 |
| Hispano-Suiza Type 8A | 1915 | V-moottori | 202 | 150 | 11,76 | 17,18 | 1,35 | 12,76 |
| Argus As.III | 1916 | Rivimoottori | 330 | 180 | 15,8 | 20,89 | 1,83 | 11,39 |
| Beardmore 160hv | 1916 | Rivimoottori | 266 | 160 | 16,8 | 15,83 | 1,66 | 9,52 |
| Benz Bz.IIIaü | 1916/1917 | Rivimoottori | 289 | 195 | 17,6 | 16,42 | 1,48 | 11,08 |
| Hispano-Suiza 200hv | 1916 | V-moottori | 245 | 200 | 11,76 | 20,83 | 1,23 | 17,01 |
| BMW IIIa | 1917 | Rivimoottori | 302 | 185 | 19 | 15,89 | 1,63 | 9,74 |
| Oberursel UR.IIa | 1917 | Pyörivä | 135 | 115 | 15,1 | 8,94 | 1,17 | 7,62 |
| Oberursel UR.IIIa | 1917 | Pyörivä | 170 | 145 | 18,4 | 9,24 | 1,17 | 7,88 |
| Benz Bz. IIIb | 1917 | Rivimoottori | 277 | 195 | 13,75 | 20,15 | 1,42 | 14,18 |
| Rolls-Royce Eagle VIII | 1917 | V-moottori | 384 | 350 | 20,2 | 19,01 | 1,10 | 17,33 |
| Rolls-Royce Falcon Mk.III | 1917 | V-moottori | 286 | 275 | 14,2 | 20,14 | 1,04 | 19,37 |
| Siemens Sh.III | 1917/1918 | Pyörivä | 195 | 160 | 18,5 | 10,54 | 1,22 | 8,65 |
| Siemens Sh.III | 1917/1918 | Pyörivä | 195 | 160 | 18,5 | 10,54 | 1,22 | 8,65 |

Liite 2. Ensimmäisen maailmansodan hävittäjissä käytetyt moottorit ja hävittäjät, joissa niitä käytettiin

Tässä liitteessä esitellään hävittäjälentokoneet moottoreittain. Useat hävittäjät käyttivät monia eri moottoreita sodan aikana, joten listaus on suuntaa antava. Lista kertoo, millainen hävittäjä on kyseessä ja milloin se on saapunut käyttöön länsirintamalle. Muutamille koneille on merkitty lentoonlähtöpaino, lentonopeus, käytännöllinen lakikorkeus sekä teoreettinen toiminta-aika. Lähteenä tälle liitteelle on toiminut Kenneth Munsonin kirja Ensimmäisen maailmansodan hävittäjät.

Argus As. II 120hv.

Halberstadt D.III ja Halberstadt D.V. Yksipaikkaisia kaksitasohävittäjiä. Länsirintamalla 1916 lähtien.

Argus As. III 180hv.

Hannover CL.II ja CL.III Kaksipaikkainen saattohävittäjä. Joulukuusta 1917 länsirintamalla. Hannover CL.IIIa: Lentoonlähtöpaino 1080kg, suurin nopeus 165km/h 600m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 7500m, toiminta-aika 3h.

L.F.G. Roland D.IIa ja Roland D.III. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla 1917 alusta lähtien.

Beardmore 120hv.

F.E.2b. Kaksipaikkainen työntöpotkurikone. Länsirintamalla toukokuusta 1915 eteenpäin. 1916 kesällä F.E.2b:hen asennettiin uusi, tehokkaampi Beardmore

160hv -moottori. Käytännöllinen lakikorkeus 2750m. Lentoonlähtöpaino 1346kg, suurin nopeus merenpinnan tasalla: 126,9km/h, toiminta-aika 2,5h.

Martinsyde G.100. Brittiläinen yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla alkuvuodesta 1916 lähtien. Lentoonlähtöpaino 1099kg, suurin nopeus 153km/h 2000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 4250m, toiminta-aika 5,5h.

Beardmore 160hv.

Martinsyde G.102. Brittiläinen yksipaikkainen hävittäjä.

F.E.2b. Kaksipaikkainen työntöpotkurikone. 160-hevosvoimaisella Beardmorella varustettuna länsirintamalla 1916 lähtien.

Bentley BR.1 150hv.

Sopwith Camel. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla 1917 lähtien.

Bentley BR.1 230hv.

Sopwith Snipe. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla kesästä 1918 lähtien. Lentoonlähtöpaino 916kg. Suurin nopeus 195km/h 3050m korkeudessa. Käytännöllinen lakikorkeus 5950m. Toiminta-aika 3h.

Benz Bz. IIIa 150hv.

L.F.G Roland D.VIa ja D.VIb. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla 1918 lähtien. D.VIb: Suurin nopeus 182,5km/h 2000m korkeudessa. Käytännöllinen lakikorkeus 5800m, lentoonlähtöpaino 860kg, toiminta-aika: 2h.

Benz Bz.IVü 200hv.

Pfalz D.XII. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä.

BMW IIIa 185hv.

Fokker D.VIIF. Kuuluisa yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Kesästä 1918 lähtien länsirintamalla. Ehkä ensimmäisen maailmansodan paras hävittäjä.

Clerget 9 Z ja 9 B 110/130hv.

Nieuport 12. Kaksipaikkainen hävittäjä-/tiedustelulentokone. Länsirintamalla 1915 lähtien. Nieuport 12C.2: lentoonlähtöpaino 920kg, suurin nopeus 155km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 4700m, toiminta-aika 2h 45min.

Sopwith Camel. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla 1917 lähtien. Clerget 9 B:llä varustettu Sopwith Camel oli nopein Sopwith Cameleista. Sodan lopussa yli puolet Britannian Ilmavoimien Cameleista oli juuri Clerget-moottorilla varustettuja. Lentoonlähtöpaino 659kg. Suurin nopeus 182km/h 3050m korkeudessa. Käytännöllinen lakikorkeus 5800m. Toiminta-aika 2,5h.

Sopwith Triplane. Yksipaikkainen kolmitasohävittäjä. Länsirintamalla vuoden 1916 lopusta lähtien. 9 B:llä lentoonlähtöpaino 699kg. Suurin nopeus 182km/h 2000m korkeudessa. Käytännöllinen lakikorkeus 6250m. Toiminta-aika 2h 45min.

Gnome Monosoupape 7 Type A 80hv.

Bristol Scout C. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla alkuvuodesta 1915 lähtien. Lentoonlähtöpaino 544kg, suurin nopeus 149km/h merenpinnan korkeudella, käytännöllinen lakikorkeus 4700m, toiminta-aika 2,5h.

Nieuport 10. Kaksipaikkainen yleislentokone, jota käytettiin myös hävittäjämuunnoksena. Hävittäjämuunnoksessa toinen istuinpaikka katettiin, jolloin koneesta tuli yksipaikkainen. Länsirintamalla kesästä 1915 lähtien.

Nieuport 11 "Bébé". Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla tammikuusta 1916 lähtien.

Morane-Saulnier L, LA ja P. Yksi- tai kaksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla sodan alkuvaiheista lähtien. Morane-Saulnier L: lentoonlähtöpaino 680kg. Suurin nopeus 115km/h merenpinnan tasalla. Käytännöllinen lakikorkeus 4000m. Toimintamatka 450km.

Morane-Saulnier N. Yksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla 1915 lähtien.

Gnome Monosoupape 9 Type B-2 100hv

Airco DH-2. Yksipaikkainen työntöpotkurihävittäjä. Länsirintamalla 1916 lähtien. Nopeus: 150km/h merenpinnan korkeudella, lakikorkeus 4400m, lentoonlähtöpaino 654kg, toiminta-aika 2h 45min.

Royal Aircraft Factory F.E.8. Yksipaikkainen työntöpotkurihävittäjä. Länsirintamalla 1916 lähtien. Lentoonlähtöpaino 611kg, suurin nopeus 151km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 4400m, toiminta-aika noin 4h.

Vickers F.B.5 "Gunbus". Kaksipaikkainen työntöpotkurikone. 1915 heinäkuusta 1916 heinäkuuhun länsirintamalla. Suurin nopeus 113km/h 1500m korkeudessa, lentoonlähtöpaino 930kg, toiminta-aika noin 4h, käytännöllinen lakikorkeus 2750m (kesti lähes puoli tuntia saavuttaa tämä korkeus).

Sopwith Camel. Maineikas yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla kesästä 1917 lähtien.

Morane-Saulnier A.I. Ranskalainen yksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla 1917 lopusta lähtien.

Gnome Monosoupape 9 Type N 150hv.

Nieuport 28. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla maaliskuusta 1918 lähtien. Lentoonlähtöpaino 737kg, suurin nopeus 196km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 5200m, toiminta-aika 1,5h.

Hispano-Suiza 8A 150hv.

S.E.5. Kuuluisa yksipaikkainen hävittäjä. Maaliskuusta 1917 lähtien rintamalla.

Hispano-Suiza 8Aa 150hv.

Spad VII. Syyskuusta 1916 länsirintamalla. Kaartonopeus ensiluokkainen. Erinomainen nousunopeus 3600 metriin. Lentoonlähtöpaino 740kg, suurin nopeus 192km/h 2000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5350m, toiminta-aika 2h 15min.

Hispano-Suiza 8Ba 220hv.

Spad XIII. Ranskalainen yksipaikkainen hävittäjä.

Hispano-Suiza 8B 200hv.

Sopwith 5F.1 Dolphin. Lentoonlähtöpaino 894kg, suurin nopeus 192km/h 3050m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5800m, toiminta-aika 1h 45min.

Hispano-Suiza 8Be 235hv.

Spad XIII C. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla 1917 lähtien. Lento-ölähtöpaino 820kg, suurin nopeus 222km/h 2000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 6650m, toiminta-aika 2h.

Le Rhône 9C 80hv.

Bristol Scout C. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla alkuvuodesta 1915 lähtien.

Nieuport 10. Kaksipaikkainen yleislentokone, jota käytettiin myös hävittäjämuunnoksena. Hävittäjämuunnoksessa toinen istuinpaikka katettiin, jolloin koneesta tuli yksipaikkainen. Länsirintamalla kesästä 1915 lähtien.

Nieuport 11 "Bébé". Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla tammikuusta 1916 lähtien. Lento-ölähtöpaino 480kg, suurin nopeus 156km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 4600m, toiminta-aika 2,5h.

Sopwith Pup. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla loppuvuodesta 1916 lähtien. Lento-ölähtöpaino 556kg, suurin nopeus 179km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 5300m, toiminta-aika 3h.

Le Rhône 9J 110hv.

Spad A2. Kaksipaikkainen vetopotkurikone, jossa tähyistäjä istui moottorin edessä lentokoneen keulassa. Lento-ölähtöpaino 709kg, suurin nopeus merenpinnan tasalla 130km/h, käytännöllinen lakikorkeus 3300m, toimintamatka 250km.

Nieuport 16. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla 1916 lähtien.

Nieuport 17. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla keväästä 1916 lähtien. Nieuport 17:n nousunopeus oli aikanaan vertaansa vailla ja siinä oli erinomai-

set taistelusuoritusarvot. Lento-ölähtöpaino 565kg, suurin nopeus 177km/h 2000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5300m, toiminta-aika 2h.

Nieuport 27. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla 1917 lähtien. 120hv Le Rhône 9 Jb -moottorilla: Lento-ölähtöpaino 585kg, suurin nopeus 186km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 5550m, toiminta-aika 1,5h.

Hanriot HD.1. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla 1916 lähtien. Lento-ölähtöpaino 605kg, 183km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 6300m, toiminta-aika 2,5h.

Airco D.H.5. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla alkukesästä 1917 lähtien.

Sopwith Camel. Le Rhône 9J -moottorilla varustettu Camel oli nopein nousija Sopwith Cameleista.

Fokker Dr.I. Maineikas kolmitasohävittäjä. Fokker Dr.I:ssä käytettiin Thulinin rakentamia Le Rhône -kopioita. Lento-ölähtöpaino 585kg. Suurin nopeus 165km/h 4000m korkeudessa. Käytännöllinen lakikorkeus 6100m. Toiminta-aika 1,5h.

Fokker E.V. Yksitasoinen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla kesästä 1918 lähtien.

Morane-Saulnier N. Yksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla 1915 lähtien. Lento-ölähtöpaino 510kg. Suurin nopeus 165km/h 2000m korkeudessa. Käytännöllinen lakikorkeus 4000m. Toiminta-aika 1,5h.

Mercedes D.II 120hv.

Fokker D.I. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla kesästä 1916 lähtien.

Halberstadt D.II. Yksipaikkainen hävittäjä, länsirintamalla kesästä 1916. Lentoonlähtöpaino 730kg, suurin nopeus 145km/h merenpinnan tasolla, käytännöllinen lakikorkeus 4000m, toiminta-aika 1,5.

Mercedes D.III 160hv.

Halberstadt CL-II ja CL-IV. Kaksipaikkainen saattohävittäjä tai maataistelukone. CL-II tuli palveluskäyttöön kesällä 1917, CL-IV alkuvuodesta 1918. Halberstadt CL.II: Lentoonlähtöpaino 1133kg, suurin nopeus 165km/h 5000 metrin korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5100m, toiminta-aika 3h.

Pfalz D.III ja IIIa. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla elokuusta 1917 eteenpäin. Lentoonlähtöpaino 932kg, suurin nopeus 165km/h 3000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5200m ja toiminta-aika 2,5h.

L.F.G Roland D.II. Yksipaikkainen hävittäjä. Palveluskäytössä länsirintamalla alkuvuodesta 1917 lähtien.

Albatros D.I . Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Ensimmäinen kahdelle konekiväärille suunniteltu saksalainen hävittäjä. Länsirintamalla syyskuusta 1916 lähtien.

Albatros D.II. Länsirintamalle korvaamaan Albatros D.I lokakuussa 1916. Lentoonlähtöpaino 888kg, suurin nopeus 175km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 5200m, toiminta-aika 1,5h.

Mercedes D.IIIa 180hv.

Albatros D.III. Korvasivat aikaisempia Albatroseja vuoden 1917 tammikuusta lähtien. Lentoonlähtöpaino 886kg, suurin nopeus 175km/h 1000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5500m, toiminta-aika 2h.

Albatros D.V ja D.Va. D.V. tuli länsirintamalle kesällä 1917, D.Va saman vuoden syksyllä. Albatros D.Va: lentoonlähtöpaino 937kg, suurin nopeus 187km/h 1000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 6250m, toiminta-aika 2h.

Pfalz D.XII. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Palveluskäyttöön kone tuli kesällä 1918. Lentoonlähtöpaino 897kg, suurin nopeus 170km/h 3000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5650m, toiminta-aika 2,5h.

Fokker D.VII. Länsirintamalla 1918 eteenpäin.

Oberursel U.I 100hv.

Fokker D.II. Yksipaikkainen, kaksitasoinen saattohävittäjä. Länsirintamalla 1916 lähtien. Lentoonlähtöpaino 575kg, suurin nopeus 150km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 4000m, toiminta-aika 1,5h.

Fokker E.II. Yksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla vuoden 1915 kesästä lähtien.

Fokker E.III. Yksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla vuoden 1915 kesästä lähtien. Lentoonlähtöpaino 635kg. Suurin nopeus 134km/h 2000m korkeudessa. Käytännöllinen lakikorkeus 3500m. Toiminta-aika 2h 45min.

Oberursel UR.II 110hv.

Fokker D.VI. Yksipaikkainen hävittäjä. Konetta käytettiin länsirintamalla vain vähän kevästä 1918 lähtien, koska Fokker D.VII saapui samoihin aikoihin ja oli suorituskyvyiltään parempi. Lentoonlähtöpaino 583kg, suurin nopeus 196km/h merenpinnan tasalla, käytännöllinen lakikorkeus 6000m, toiminta-aika 1,5h.

Fokker Dr.I. Kuuluisa yksipaikkainen kolmitasohävittäjä. Länsirintamalla elokuusta 1917 lähtien.

Fokker E.V. Yksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla kesästä 1918 lähtien. Lentoonlähtöpaino 562kg. Suurin nopeus 185km/h merenpinnan tasalla. Käytännöllinen lakikorkeus 6300m. Toiminta-aika 1,5h.

Oberursel U.III 160hv.

Fokker D.III. Yksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla 1916 syksystä lähtien.

Fokker E.IV. Yksipaikkainen yksitasohävittäjä. Länsirintamalla loppuvuodesta 1915 lähtien.

R.A.F.4a 150hv.

Royal Aircraft Factory B.E.12. Konetta käytettiin ensimmäistä kertaa taistelussa länsirintamalla elokuussa 1916, mutta seuraavassa kuussa ne määrättiin pois rintamalta. Lentoonlähtöpaino 1067kg, suurin nopeus 156km/h 2000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 3800m ja toiminta-aika 3h.

Rolls-Royce Falcon Mk.I 190hv.

Bristol F.2A. Kaksipaikkainen hävittäjä (tunnetaan myös nimellä Bristol Fighter). Länsirintamalla maaliskuusta 1917 lähtien.

Rolls-Royce Falcon Mk.II 220hv ja Mk.III 275hv.

Bristol F.2B. Kaksipaikkainen kaksitasohävittäjä. Länsirintamalla 1917 lähtien. Käytti ensin Falcon Mk.II:a, sitten myöhemmin Falcon Mk.III:a. Falcon Mk.III:lla varustettu F.2B: lentoonlähtöpaino 1261kg, suurin nopeus 192km/h 2000m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 6100m ja toiminta-aika 3h.

Rolls-Royce Eagle 250hv Mk. III.

F.E.2d. Kaksipaikkainen työntöpotkurikone. Länsirintamalla heinäkuusta 1916 lähtien.

Siemens-Halske Sh.III 160hv.

Siemens-Schuckert D.III. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla alkuvuodesta 1918 lähtien.

Siemens-Schuckert D.IV. Yksipaikkainen hävittäjä. Länsirintamalla kesästä 1918 lähtien. Nousunopeus oli huima: 6000 metriin se nousi 14,5 minuutissa.

Wolseley W.4a Viper-V 200hv.

S.E.5a. Yksipaikkainen hävittäjä. Kesäkuusta 1917 lähtien länsirintamalla. Lentoonlähtöpaino 902kg, suurin nopeus 193km/h 4600m korkeudessa, käytännöllinen lakikorkeus 5950m, toiminta-aika 3h.