Sagan om gasturbinen

Av Ingvar Jung

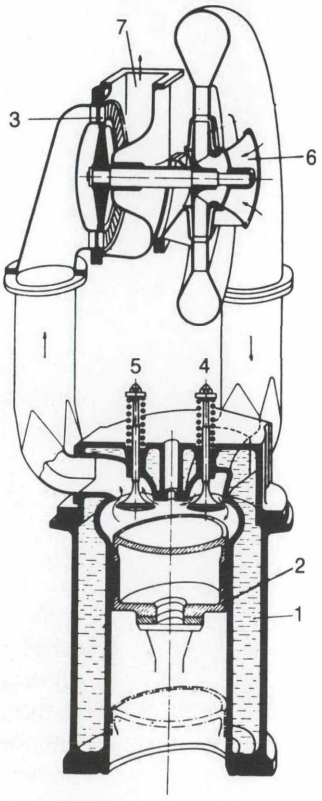
Från Büchi till Klas Fleming från Lysholm och Junkers till Dovern och Jas, från T3 och Spica till Peder Skram och Kara.

Den generation som nu befinner sig i pensionsåldern har minnen från de första flygplanen gjorda i trä, drivna av vrålande bensinmotorer och minns kanske den epok då tyskarna med sina Zeppelinare försökte genomföra en regelbunden luftskeppstrafik över Atlanten, liksom passagerarflygets första stapplande försök. De stora utvecklingsstegen på flygmotorområdet gjordes av dåvarande stormakter under och strax efter de två krigsperioderna 1914–1918 och 1939–1945. Nuvarande ungdomsgeneration har vuxit upp under en tid då Jetplanen helt dominerat den interkontinentala passagerartrafiken. Ungdomen finner det självfallet att under en semestertid kunna resa till avlägsna länder med restider i timmar i stället för i dagar och veckor. Mot denna bakgrund kan det vara av intresse att rekapitulera, hur gasturbinen vunnit sin nuvarande position till lands, till sjöss och i luften.

Dieselmotorn får hjälp av gasturbinen

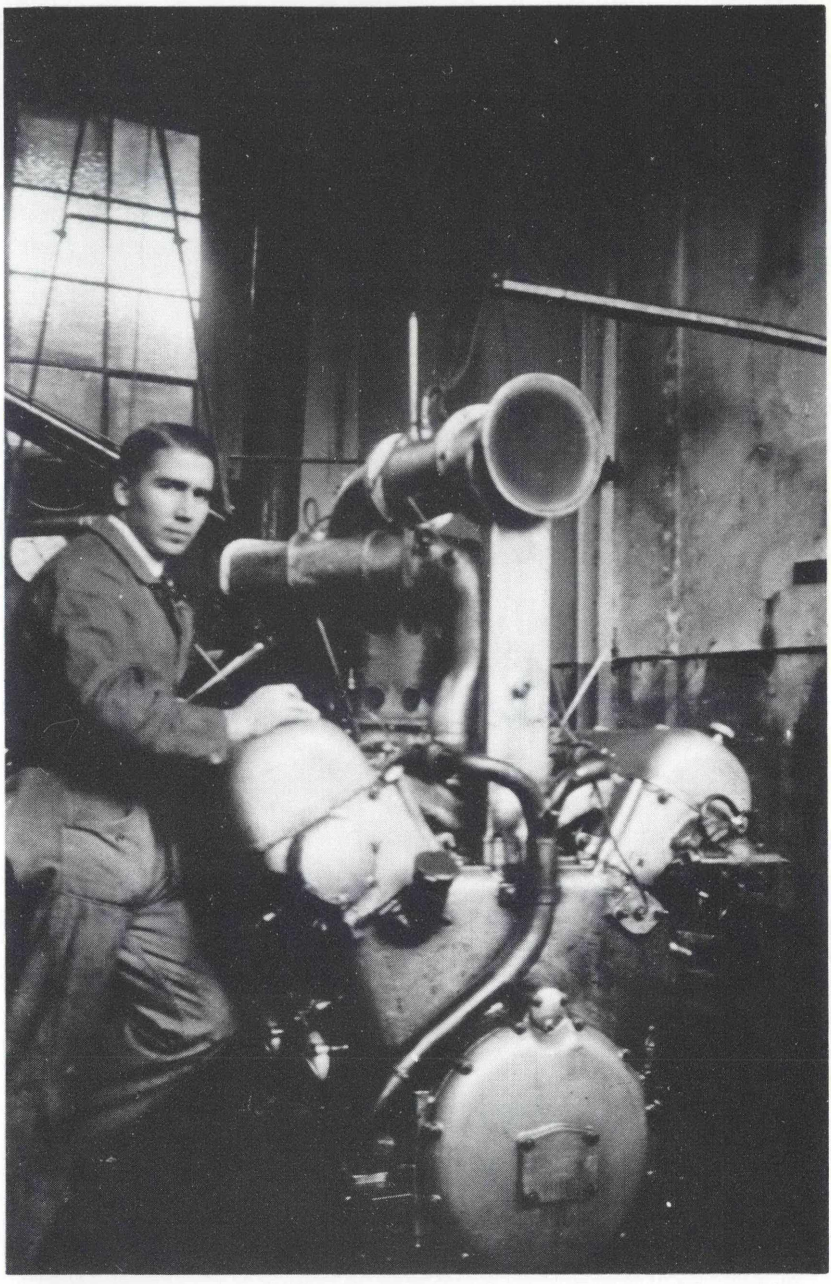
Sagan om gasturbinen började förmer än 75 år sedan. En ung schweizisk ingenjör Alfred Büchi, nyligen examinerad från Zürichs Tekniska Högskola, inlämnade år 1905 ett patent, som avsåg att höja den uttagbara effekten hos en Diesel- eller Ottomotor genom att förkomprimera förbränningsluften medels en turbin, driven av motorns avgaser enligt schema figur 1. Patentet väckte ej alltför stor uppmärksamhet. Büchi fick sålunda vänta hela 10 år innan han kunde realisera sina idéer. Han flyttade till Tyskland och samarbetade med den store tyske konstruktören av fartygsmaskinerier, Gustav Bauer i Kiel. 1922 lyckades han erhålla en beställning på uppladdningsaggregat för dieselmotorerna till två passagerarfartyg. Han utlovade att uppladdningen skulle möjliggöra en 50 %-ig effektökning hos motorerna. Det djärva experimentet lyckades till fullo. I motorerna behövde endast mindre ändringar göras. Trots detta kunde den förhöjda effekten tas ut från fartygets 4-takts dieselmotorer utan besvär. Uppladdningen medförde även en något reducerad specifik bränsleförbrukning.

1. Büchis uppladdningssystem för 4-takts diesel- och Ottomotorer patentsökt 1905. 1 = motorns cylinder i genomskärning. 2 = kolv. 3 = gasturbin. 4 = insugningsventil. 5 = utblåsningsventil. 6 = lufttillopp. 7 = till avgasrör.



Büchi lät konstruera och tillverka sina uppladdningsaggregat vid den schweiziska firman Brown Boveri. Sedan erfarenhet erhållits med de första installationerna var succén med fyrtaktsuppladdningen ett faktum, Brown Boveri kunde snart notera orderinflöden av hundratals uppladdningsaggregat för stationära och marina 4-taktsdieselmotorer. Ett betydelsefullt steg i utvecklingen gjordes av den tyska dieseltillverkaren Maybach i samarbete med Brown Boveri. Det gällde dieselmotorerna för luftskeppet "Graf Zeppelin" som utprovades 1932/33. Här gällde det för Zeppelinverken att få fram en lätt, bränslesnål dieselmotor för att möjliggöra en ekonomisk passagerartrafik över Atlanten. Den normala dieselmotorn var alltför tung och tappade dessutom effekt så fort den kom upp på höjd. Redan på 2 500 meters höjd förlorade man 25 % av effekten. Büchiuppladdade snabbgående Maybachmotorn var här idealisk. Då lufttrycket minskade ökade avgasturbinens effekt och dessutom minskade de låga lufttemperaturerna kompressionsarbetet.

Figur 2 visar Brown Boveris vertikala uppladdningsaggregat monterat på ett av Maybachs fem 12-cylindriga motorer för "Graf Zeppelin". Experimentet lyckades till fullo, men Zeppelinarnas saga tog ett snabbt och katastrofalt slut i och med luftskeppsolyckorna i Amerika och Hindenburgolyckan 1937. De snabbgående lätta uppladdade dieselmotorerna

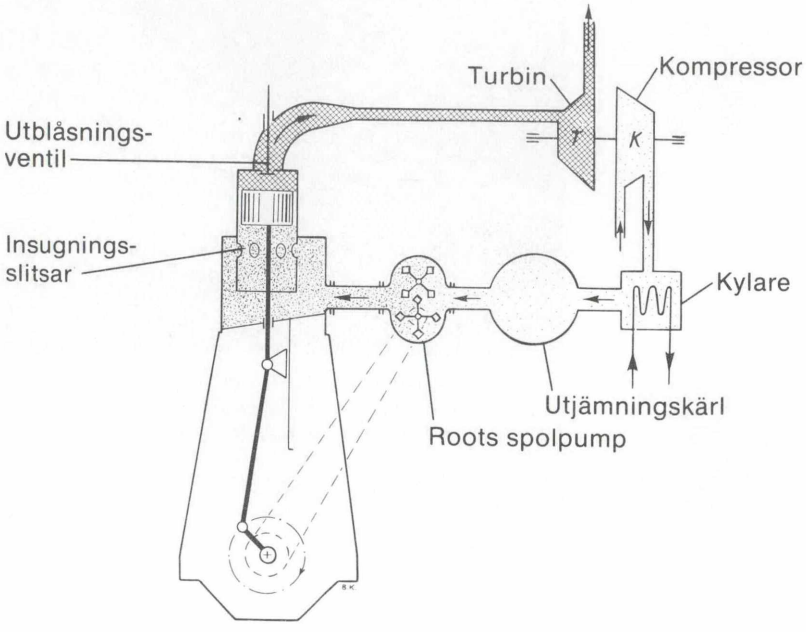


2. Maybachs provmotor för "Graf Zeppelin" 1933 med Brown Boveri uppladdningsaggregat med vertikal axel. Den 12 cylindriga V-motorn uppladdades från 310 till 515 kW. Den unge mannen på bilden är uppsatsens författare.

inledde emellertid ett segertåg för dieseldriften inom världens järnvägar. När elektrifiering av olika skäl ej var lönsam, ersattes ånglokomotiven av diesellok med uppladdade motorer. Tyska Reichsbahns lokomotiv med Maybachs uppladdade "Zeppelin"-motorer satte 1939 hastighetsrekord för lokomotiv med 216 km/tim.

Diesellokutvecklingen med uppladdade motorer var speciellt framgångsrik i Förenta Staterna. Även om uppladdningen av dieselmotorer gick snabbt fram för traktionära ändamål, inträffade en motsatt tendens för fartygsdrift. Här visade sig den långsamgående direktkopplade 2-taktmotorn klart överlägsen 4-taktsmotorn, trots att den senare kunde uppladdas. 2-taktsmotorn var enklare och billigare och kunde även ouppladdad ge en överlägsen ekonomi vid fartygsdrift. 4-taktscykeln försvann i det närmaste som huvudmotor under 30-talet, då det gällde högre effektbelopp. Vid en 4-taktscykel kan motorn leverera het avgas till uppladdningsaggregatets turbin under sista delen av expansionslaget och under hela utblåsningsslaget. En betydande del av utblåsningspuffens energi kan utnyttjas vid det så kallade impulssystemet, där varje cylinder eller cylinderpar har separata avgasledningar till avskilda munstycksgrupper i turbinen. Vid en 2-taktsmotor måste utblåsning och renblåsning ske under den korta tid utblåsningsslitsarna (eller ventilerna) och inblåsningskanalerna står öppna. Detta förhållande gjorde att Büchisystemet ej kunde utnyttjas vid 2-taktsmotorer trots många försök. Kraven på turbin- och kompressorverkningsgrader var högre och tryckförlusterna vid genomflödet i motorn måste reduceras, om 2-taktsuppladdningen skulle kunna förverkligas.

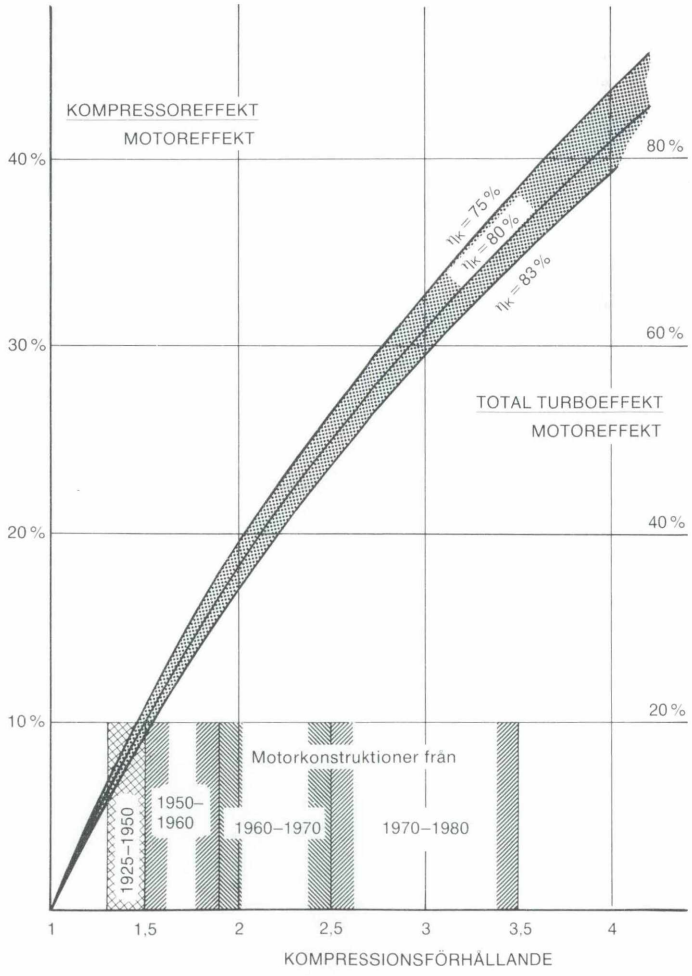
3. Schematisk bild av Brown Boveris/Curtis tvåtaktsmotorer av år 1950.

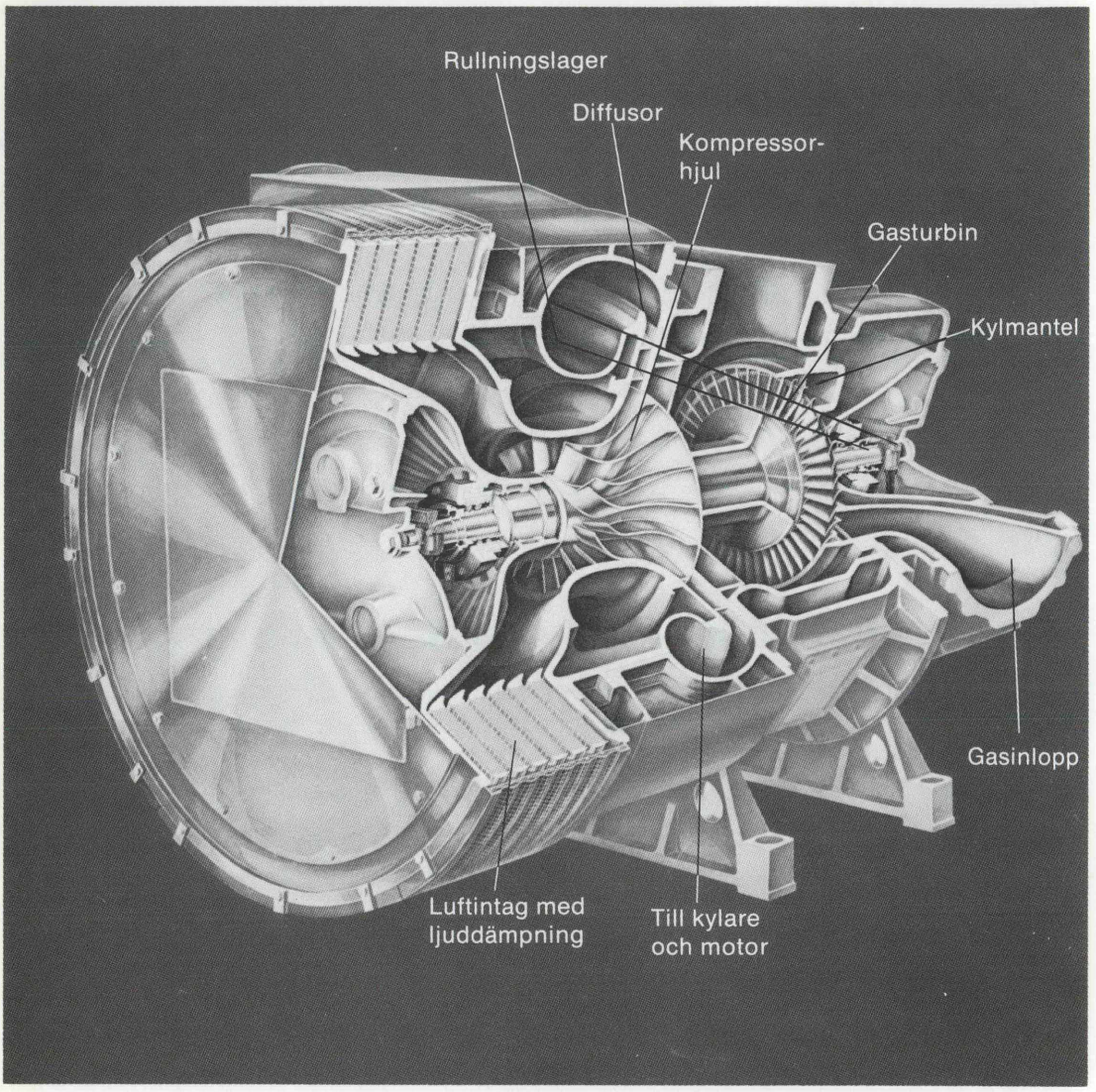


Då Büchi-patenten utlöpt fick Brown Boveri ett flertal konkurrenter såsom Rateau i Frankrike, Napier i England, Burmeister & Wain i Danmark och General Motors i USA m fl. Företaget lyckades likväl behålla sin dominerande ställning på marknaden genom successiva förbättringar. I intimt samarbete med de stora dieseltillverkarna kunde Brown Boveri undan för undan höja uppladdningstrycken genom förbättrade verkningsgrader.

1950 kom äntligen genombrottet för 2-taktsuppladdningen. Brown Boveri och Burmeister & Wain lyckades uppladda en stor 2-takts fartygsmotor med ett utförande enligt figur 3. Burmeister bibehöll sin spolpump och

4. Diagram visande uppladdningsaggregatens kompressoreffekt samt sammanlagda kompressor och turbiaeffekten i förhållande till motoreffekten vid olika kopressionsförhållanden och kompressorverkningsgrad.





5. Brown Boveri uppladdningsaggregat för en stor dieselmotor, kompressionsförhållande 3,5, varvtal 15 000 v/min, kompressionseffekten 5 000 kW.

luften från uppladdningsaggregatet passerade en särskild kylare. Ett utjämningskärl tillförsäkrade att tillräcklig luftvolym stod till buds för genomblåsningen. Med detta pionjärarbete var uppladdningens introduktion säkrat även för de stora direktdrivande 2-takts fartygsmotorerna.

Sedan 1950 har 2-taktsuppladdningen fullkomnats och högre och högre uppladdningstryck har kunnat utnyttjas. Allt bättre verkningsgrader har gjort det möjligt att på 80-talet ta ut mer än fyra gånger så stor effekt per cylindervolym jämfört med 40-talets motorer. Samtidigt har bränsleförbrukningen reducerats. Den termiska verkningsgraden för en stor 2-taktsuppladdad dieselmotor har genom insatser från Sultzer, Burmeister & Wain samt Brown Boveri höjts från ca 35–36 % till rekordvärden upp emot 50 %, värden som ingen annan värmemotor lyckats komma i närheten av. I dag utnyttjas uppladdningstryck av 2,5–4 bar och därvid uppnår sammanlagda effekten från gasturbinen och kompressorn till mellan 50 och 80 % av dieselmotorns avgivna effekt, figur 4.

Dagens dieselfartyg är sålunda till stor del "turbindrivna" och den installerade turbineffekten i dieselfartyg är större än i den sammanlagda ångdrivna handelsflottan. Hur ett modernt stort uppladdningsaggregat ser ut framgår av figur 5. Det är emellertid ej enbart stora dieselmotorer som uppladdats. Svenska Volvo och Saab har varit föregångare att uppladda bensinmotorer för person- och lastbilar. Japanerna utvecklar små gasturbiner med kompressorer och turbinhjul med diametrar i trådrulleformat med varvtal i storleksordningen 100 000–150 000 v/min. Uppladdningen av bilmotorerna innebär lättare och mera bränslesnåla motorer för person- och lastbilsbefordran. På detta område kan man förutse en snabb utveckling. Den uppladdade Ottomotorn torde bli lika vanlig som den uppladdade dieselmotorn till sjöss.

Ångpannan som blev en gasturbin

Det låg nära till hands för Brown Boveri som tillverkare av ångkraftcentraler att uppladda ångcykelns panna på samma sätt som Büchi uppladdat dieselmotorn. Under början av 30-talet tillkom sådana uppladdade s k Veloxpannor och Brown Boveri levererade totalt något hundratal sådana. Man fann emellertid vid utprovandet av de första anläggningarna att uppladdningsaggregatet måste tillföras ganska stora effektbelopp för att uppladdningstrycket skulle kunna hållas. Detta skedde genom en elmotor eller en hjälpångturbin. För att övervinna denna svårighet vid Veloxpannan genomfördes vid Brown Boveri ett mycket betydelsefullt utvecklingsarbete för att förbättra kompressorns verkningsgrad. Man hade hittills endast utnyttjat centrifugalkompressorer.

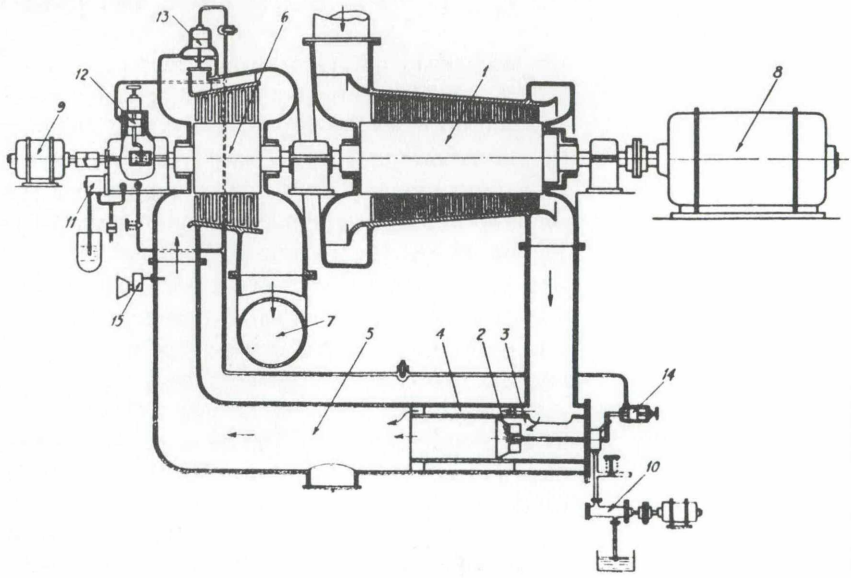
Genom Claud Seippels insatser tillkom en ny typ av kompressor med axiell genomströmning. Härigenom kunde kompressorverkningsgraderna höjas från 65–75 % vid centrifugalkompressorerna till 85–90 %. Under mitten av 30-talet visade det sig att Veloxpannor utrustade med axialkompressorer hade effektöverskott i stället för underskott i uppladdningsaggregatet och att det sålunda kunde avgiva elkraft och samtidigt uppladda

pannan. Med detta var det bevisat att den enkla gasturbinen var en reell möjlighet för elproduktion. 1936 beslöt Brown Boveri att Veloxpannans uppladdningsaggregat med axialkompressorer skulle utvecklas för kraftproduktion.

1939 kunde företaget uppvisa världens första driftdugliga gasturbin på 4 000 kW vid världsutställningen i Zürich, figur 6. Maskineriet blev oerhört enkelt, men verkningsgraden var låg, endast 16–17 %. Kriget kom emellertid emellan och världens turbinbyggare fick annat att tänka på, än att finna användningsområden för en ny kraftkälla, som visserligen var enkel och billig, men som hade en bränsleförbrukning som var nära den dubbla jämfört med de traditionella ånganläggningarnas.

Brown Boveris Neuchâtelanläggning av 1939 visade emellertid att en ny kompressortyp med mycket höga verkningsgrader tillkommit och att en värmemotor med en gasturbinprocess var möjlig och utvecklingsbar. Veloxprincipen försvann efter ett antal år. Den var för dyrbar och komplicerad. Det var ju dessutom bara pannan som vann på uppladdningen, alla andra komponenter i ångcykeln var oförändrat dyrbara och komplicerade.

6. Brown Boveris och världens första gasturbin för reservkraftverket i Neuchatel, 4 000 kW 1939. 1 = Axialkompressor. 2 = Brännare. 3 = Primärluftintag. 4 = Kylluftkanal. 5 = Blandningsrum för kylluft och förbränningsluft. 6 = Gasturbin. 7 = Avgaskanal till skorsten. 8 = Generator. 9 = Startmotor med frikoppling. 10 = Brännoljepump. 11 = Pump för smörjolja och regleringsolja. 12 = Snabbstängare för alltför högt varvtal. 13 = Säkerhetsventil påverkad av 12. 14 = Servomotor för brännoljereglering. 15 = Alarmapparat för alltför hög temperatur.



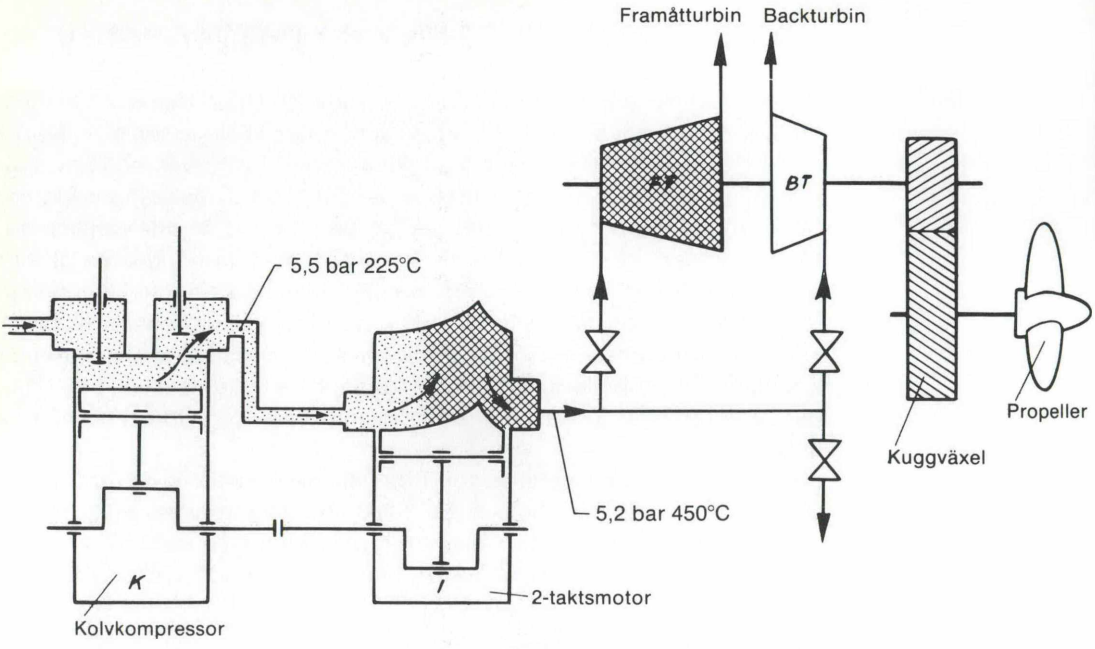
Dieselmotorn som blev en gasgenerator

Götaverken var under 20- och 30-talen under Dr Hugo Hammars ledning ett utomordentligt innovativt företag. Uppfinnaren Erik Johansson, figur 7 (1893–1973) utvecklade bl a sin ångkompressor för förbättrande av ångmaskinprocessen. Här fick ångan expandera i en avloppsångturbin ner till kondensorns höga vacuum, sedan den lämnat ångmaskinens lågtryckscylinder. Den betydande tillskottseffekten som härigenom erhölls utnyttjades för att driva en centrifugalfläkt, som höjde ångtryck och ångtemperatur mellan högtryckscylindern och lågtryckscylindern. Götaverkens ångkompressor var klart överlägsen konkurrerande avloppsturbiner kopplade till propelleraxeln genom komplicerade kuggväxlar och dämpande kopplingar. Götaverkens ångkompressorer försåldes i betydande antal.

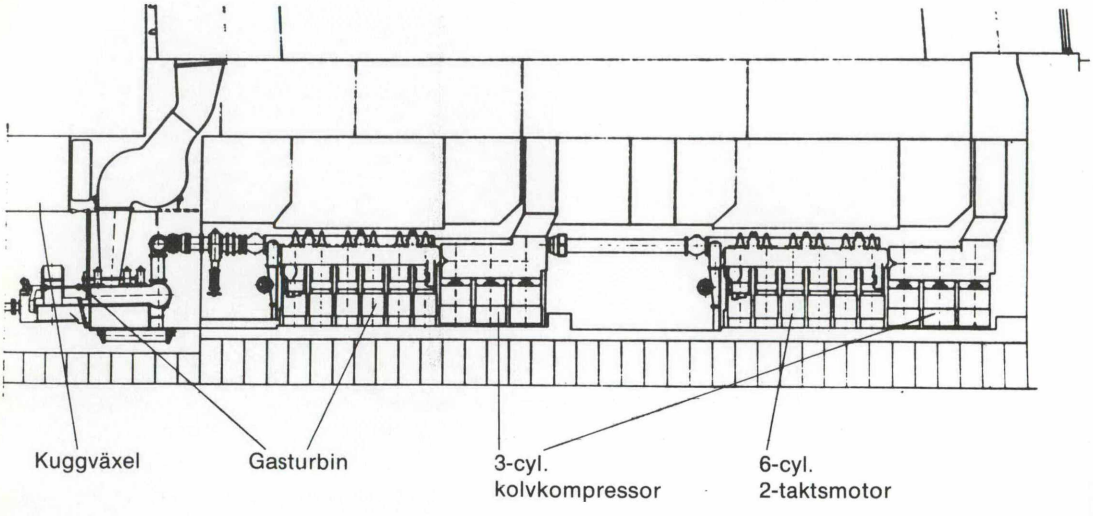
I slutet av 20-talet patenterade Erik Johansson sitt s k drivgassystem enligt principschemat i figur 8. En 2-takts dieselmotor drev en kolvkompressor som matade motorn med förbränningsluft med ett tryck av ca 5½ bar. Dieselmotorn och kompressorn fungerade sålunda som en gasgene-

7. Uppfinnaren av ångkompressorn och drivgassystemet Erik Johansson (1900–1965).





8. Erik Johanssons drivgassystem, principschema.



9. Kryssaren Klas Flemings maskinarrangemang med två dieselgasgeneratorer och en gasturbin per axel.

rator vilken försåg propellermaskinen med drivgas med en temperatur av ca 450°. En första mindre anläggning på ett hundratal kW byggdes i bogserbåten Göta som fick en kolvmaskin som kraftaggregat. Maskineriet fungerade utmärkt och Götaverken kunde inom kort tid bygga en andra prototypanläggning för sjömätningsfartyget Skagerack på 750 kW (1 000 hk). Propellermaskinen blev även här en kolvmaskin. 1936 beställde svenska marinen en ombyggnad av den 25 år gamla minkryssaren Klas Fleming, figur 9, där ett drivgasmaskineri på 5 300 kW (7 200 hk) installerades med två kraftturbiner byggda av AB de Lavals Ångturbin samt drivgasgeneratorer bestående av fyra uppladdade 6-cylindriga 2-takts dieselmotorer med direktdrivna 3-cylindriga kolvkompressorer.

Provturer och leverans skedde under kriget 1940 och "Klas Fleming" fick därför ej den internationella publicitet som normalt skulle kommit den till del. "Klas Fleming" var med sju års försprång världens första gasturbindrivna fartyg. Emellertid uppvisade fartyget en del barnsjukdomar i drift. Bränsleförbrukningen visade sig även något sämre än vad som kunde erhållas vid ren dieseldrift. Då de snabbgående lätta, uppladdade och uppväxlade dieselmotorerna, som bl a tyska marinen utvecklade visade sig driftdugliga, var drivgassystemet ej längre konkurrensdugligt.

Såväl den franska som den amerikanska marinen gjorde på 50- och 60-talen ett flertal försök med drivgasanläggningar på mindre krigsfartyg och handelsfartyg. Resultaten blev otillfredsställande. Även dess mera sofistikerade drivgasanläggningar försvann inom få år från haven. Erik Johansson och Götaverken gjorde trots allt en stor pionjärinsats. De svenska fartygen med drivgasmaskinerier fungerade i stort sett ganska bra, trots att det gällde prototyper inom ett helt oprövat område.

Jetmotorns tillkomst

Som redan nämnts hade Brown Boveri 1939 bevisat att den enkla öppna gasturbinen med axialkompressor redan utvecklats så långt att denna typ av kraftkälla var användbar och konkurrensduglig på många områden. Med 12 till 15 steg i axialkompressorn bemästrade Brown Boveri tryckförhållanden upp till 4 à 5.

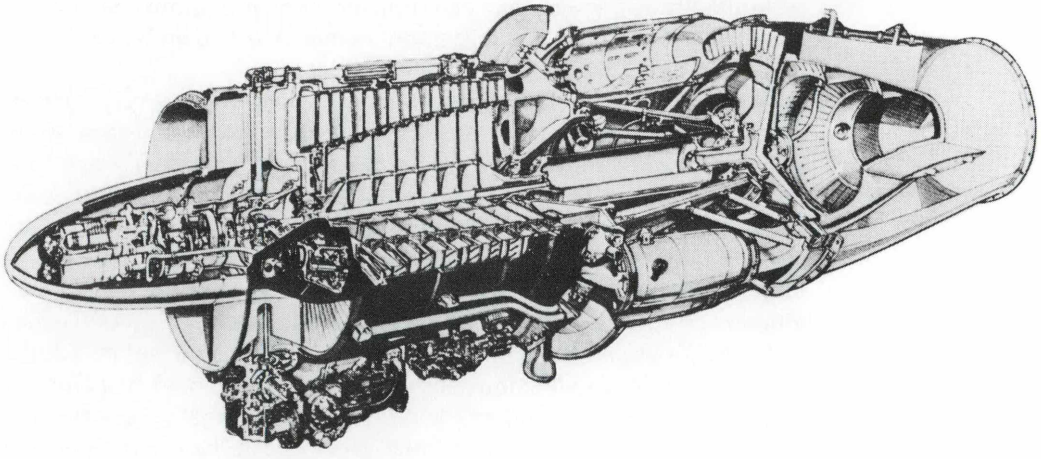
Någon tid före världskrigets utbrott besöktes Brown Boveri av den man som allmänt uppfattas som reaktionsmotorns uppfinnare Frank Whittle. Han var mycket intresserad att få del av Dr Adolf Meiers och Claud Seippels framsteg på kompressorområdet och önskade med dessa herrar diskutera möjligheten av en gasturbindriven flygmotor. Brown Boveri utdömde dock projektet som orealistiskt på grund av den höga bränsleförbrukningen. Whittle nämnde dock ej att han sedan mer än tio år arbetat med att utveckla en flygmotor arbetande utan propeller och i stället baserad på utnyttjandet av avgasstrålens reaktionskraft. Whittle å sin sida insåg ej axialkompressorns stora överlägsenhet i fråga om verkningsgrad och frontareabehov, jämfört med centrifugalkompressorn. Något samarbete kom ej till stånd och Whittle reste hem och byggde sin

första jetmotor med ett enkelt centrifugalhjul vid British Thomson Houston i Rugby. Han mötte emellertid enorma svårigheter och hans motor flög först 1945.

Tyska aerodynamiker och flygmotortillverkare började intressera sig för reaktionsdrift av snabba flygplan långt senare än Whittle. Under slutet av 30-talet arbetade emellertid tre framstående forskargrupper för att få fram en jetmotor till tyska flygvapnet. I motsats till Whittle utgick de emellertid alla från maskiner med axialkompressorer. Junkers, Heinkel och Messersmith hade alla flygfärdiga versioner av jetmotorer färdiga 1942 med en statisk dragkraft i storleksordning av 7–9 kN (700–900 kP) och ett kompressionsförhållande av ca 3. Då Whittle flög med sin Power Jets Mark W1 i jaktplanet Gloster E 28/39 1946 var den överlägsen tyskarnas motorer främst i fråga om material, där de engelska metallurgerna lyckats få fram de helt överlägsna Nimonicmaterialen. I fråga om aerodynamisk utformning var dock tyskarnas motorer överlägsna. Det tyska nederlaget var emellertid ofrånkomligt och satte ett snabbt slut på den tyska utvecklingen. Det blev de brittiska jetmotorerna som revolutionerade luftfarten.

Erik Östman har i sin bok Gasturbinutvecklingen vid STAL-LAVAL (1971) beskrivit hur svenska flygvapnet fick hand om ett störtat tyskt jaktplan med en Junkermotor och hur STAL på grundval av detta förelag byggde sin första motor "Skuten" på 15 kN dragkraft och ett tryckförhållande av 4½ under åren 1947–48. Han beskriver även hur den Whittleinspirerade jetmotorn utvecklad av professor Lysholm vid AB Flygmotor visade sig alltför komplicerad och hur STAL fick möjlighet att konstruera och prova sin "Dovern" med 30 kN dragkraft och ett kompressionsförhållande av 7.

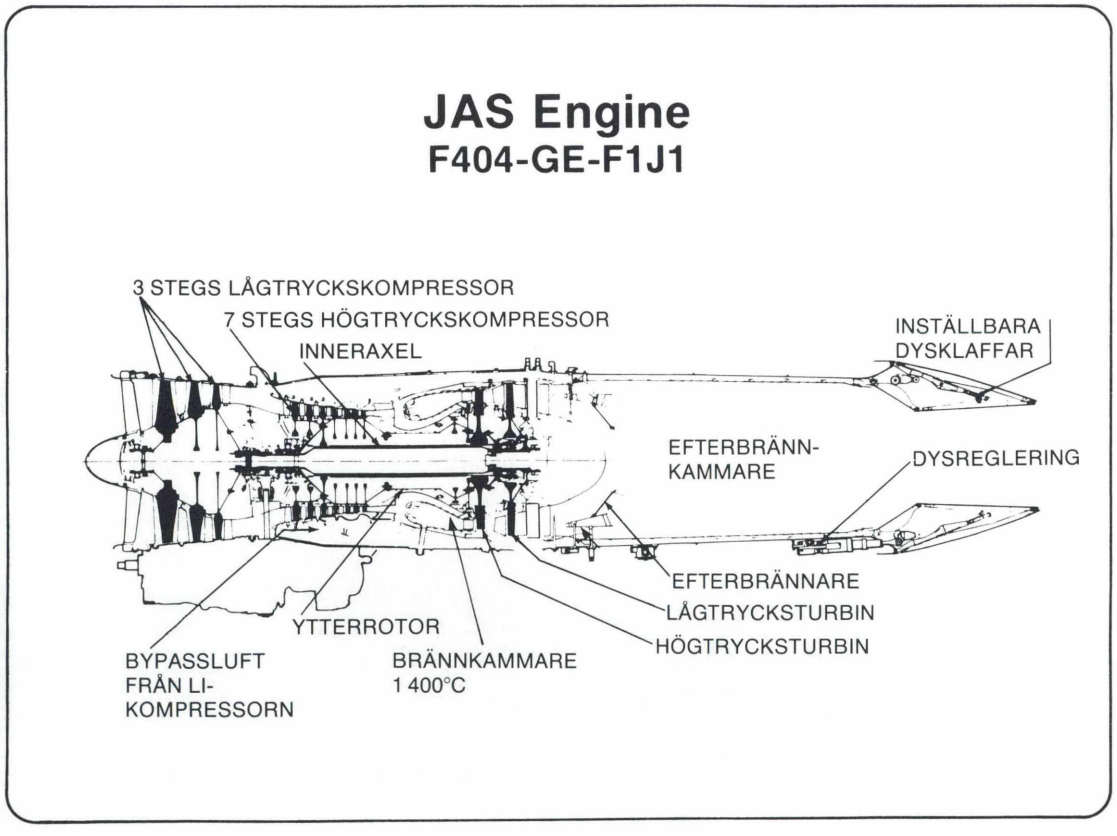
10. Röntgenperspektiv av "Dovern" av 1950. Dragkraft 3 000kP, dragkraft/vikt 1,0.



"Dovern" var i prestanda helt jämbördig med Rolls Royce "Avon" och stora förhoppningar ställdes vid STAL att få utveckla det projekterade tredje steget i utvecklingskedjan "Glan". "Glan" var efter tillrådan av STAL:s konsult professor Richard Söderberg en "twin spool" maskin med två kompressorer och två turbiner, där lågtryckskompressorn drevs av lågtrycksturbinen genom en axel gående genom ett centrumhål i högtrycksaggregatet. När Flygvapnet fann att den svenska potentialen för utveckling och forskning på området var otillräcklig jämfört med stormakternas, så beslöt man att nedlägga såväl "Dovern" som "Glan"-projekten. STAL utnyttjade emellertid "Glan"konstruktionen för ett reservkraftaggregat för Varberg. Konstruktionen har visat sig utomordentlig lyckad och är fortfarande efter mer än 25 år ett viktigt led för sysselsättningen vid STAL-LAVAL. Grundkonstruktionen har dock moderniserats i ett flertal avseenden och dess prestanda förbättrats.

Hur jetmotorerna erövrade den militära sektorn för jaktplan och bombplan under åren 1945–1955 och hur det brittiska Cometplanet 1958 visade vägen till dagens jetmotordrivna stora och snabba passagerarplan, har de

11. General Electrics jetmotor F404 med efterbrännkammare för JAS-planet. Dragkraft 4 700 hP, dragkraft/vikt 5.



flesta av oss klara minnesbilder av. Nedanstående tabell visar hur enormt jetmotorernas prestanda förbättrats sedan Junkermotorn av 1942 gjorde sin första flygtur. Bränsleförbrukningen har minskats till en tredjedel, tryckförhållandet har ökats med en faktor av nära 10. En modern jetmotor kan lyfta nära sex gånger sin egen vikt medan de första motorerna endast kunde lyfta obetydligt mera än den egna vikten. Utvecklingen kan bedömas av fig 10 och 11 och av nedanstående tabell 1.

Tabell 1 Jetmotorns utveckling

Motor	Tillverkare	Nation	År	Stegantal Kompressor Turbin	Max stat dragkraft kg	Dragkr/ Vikt	Tryckförhållande	Gas temp °C	Spec bränsle förbr kg/kP h
Jumo 004	Junkers		1942	A8–T1	895	1,11	3,0	700	1,38
Goblin II	de Havilland	GB	1943	C1–T1	1 360	1,91	3,3	800	1,30
A S X	Armstrong & Siddeley	GB	1943	A14–T1	1 180	1,37	5,5	800	1,0
Nene	Rolls Royce	GB	1946	C1–T1	2 270	3,33	4,0	825	1,06
Ghost	de Havilland	GB	1951	C1–T1	2 270	2,12	4,5	815	1,08
Avon RA7	Rolls Royce	GB	1952	A12–T2	3 400	3,16	6,5	900	0,97
Avon MK60	Rolls Royce	GB	1969	A16–T2	5 650	4,04	8,3	950	0,93
CF6	General Electric	USA	1970	A17–T2	24 000	5,71	28,0	1 200	0,40
JT9D	Pratt & Whitney	USA	1971	A15–T6	24 000	6,00	22,0	1 200	0,43
RB211	Rolls Royce	GB	1971	A16–T6	22 000	5,79	27,0	1 200	0,40
JAS-F404	General Electric	USA	1980	A10–T2	4 700	~5	~25	~1 400	~0,7

Beteckningar: C1 = entrifugalkompressor A8 = Åtta stegs axialkompressor T6 = Sexstegs gasturbin T2 = Två turbinhjul.

Gasturbiner med jetmotorteknik ersätter ångkraften till lands och till sjöss

Det enorma kapital som stormakterna under de senaste 30 åren nedlagt på forskning och utveckling på jetmotorområdet har resulterat i stora framsteg. Nya material för turbinskivor, skovlar och brännkammare har framkommit, vilka har gjort det möjligt att utnyttja långt högre gastemperaturer än förut. Genom ledskenor och löpskovlar försedda med fina kanaler för kylluft från kompressorn har en ytterligare stegring av gastemperaturen uppnåtts.

Gastemperaturer i närheten av det vanliga smidesjärnets smältpunkt användes redan. Genom framsteg inom strömningsmekaniken har det blivit möjligt att utnyttja överljudhastighet i axialkompressorerna. Därmed har tryckuppsättningen per skovelsteg kunnat ökas väsentligt. Högre kompressionsförhållanden har medfört att brännkamrarna kunnat minskas i volym och att brännkammarbelastningen kunnat höjas. Vridbara ledskenor i kompressorerna har medfört, att optimala strömningsförhållanden utan pumpnings- och avlösningsfenomen kan bibehållas under alla driftförhållanden.

Vridbara ledskenor i turbinerna tillåter att optimala effektfördelningar bibehålles vid olika belastningar där flerturbin arrangemang utnyttjas. "Twin-spool"-arrangemang med två kompressorer och två kompressorturbiner har blivit en försäljningssuccé för världens största jetmotortillverkare Pratt & Whitney och Rolls Royce. Erfarenheterna av hundratusentals jetmotorer under de mest skiftande klimatförhållanden har kunnat utnyttjas för gasturbinens användning till lands och till sjöss. Utvecklingen har därvid i princip följt två vägar på båda dessa områden.

Den enkla öppna konstruktionen med en kompressor, en brännkammare, en turbin direkt drivande en generator – som Brown Boveri introducerade 1939 – fann till början relativt ringa användning på grund av maskintypens höga bränsleförbrukning. Försök gjordes att förbättra verkningsgrader och öka enhetseffekten genom att utnyttja flera kompressorer och turbiner i serie. Många gasturbintillverkare övertog jetmotorns brännkammarearrangemang med ett flertal kammare fördelade runt periferin framför högtrycksturbinen. Man införde mellankylning och ibland mellanförbränning samt värmeväxlare för utnyttjning av avgasvärmen och försökte använda tjockolja som bränsle för att kunna konkurrera med ångprocessen för grundkraftverk.

Dessa försök slog ej särdeles väl ut. De tjocka brännoljorna visade sig försmutsa gasturbiner och värmeväxlare. Korrosion från tjockoljerester visade sig förstöra skovlarna i turbinerna redan efter korta drifttider. Efter år av erfarenhet från olika utvecklingsprojekt med komplicerade gasturbinarrangemang syntes redan på 70-talet en återgång till 1939 års enkla konstruktion ge den gynnsammaste lösningen vid större gasturbiner för elproduktion. General Electric och Westinghouse i USA, Kraftwerk Union, Brown Boveri och Fiat i Europa offererar nu i första hand enkla enaxliga maskiner med 3 600 resp 3 000 v/min med effekter upp till 100 000 kW. De förses i allmänhet med två eller flera brännkammare. Kompressorer och turbiner utrustas i stor utsträckning med vridbara ledskenor.

Den andra utvecklingslinjen – jetmotorvägen – valdes tidigt t ex av STAL med sitt reservkraftaggregat GT 35. De stora internationella jetmotortillverkarna kunde använda sina massproducerade standardelement och behövde endast komplettera aggregaten med en kraftturbin. Många gasturbintillverkare köpte sådana nya eller begagnade jetmotorer, införde vissa konstruktionsförändringar för motorernas användning för stationärt bruk och byggde själva kraftturbinerna anslutna till generatorerna. Man erhöll på så sätt små, billiga och driftsäkra kraftaggregat som dock endast var användbara för lättare bränsle. Sådana jetmotorbaserade reservkraftaggregat har byggts i hundratal i industriländerna. I de gas- och oljeproducerande länderna utnyttjas ofta sådana kraftaggregat som grundkraftverk, då bränslekostnaderna ej lägger några hinder i vägen.

Genom att kombinera ett gasturbinaggregat med en efterföljande ångcykel och där utnyttja avgasvärmet kan termiska verkningsgrader på 45–47 % erhållas. Sådana kombinationsanläggningar för grundkraft synes klart konkurrensdugliga, där naturgas och för gasturbindrift lämpliga brännoljor är tillgängliga.

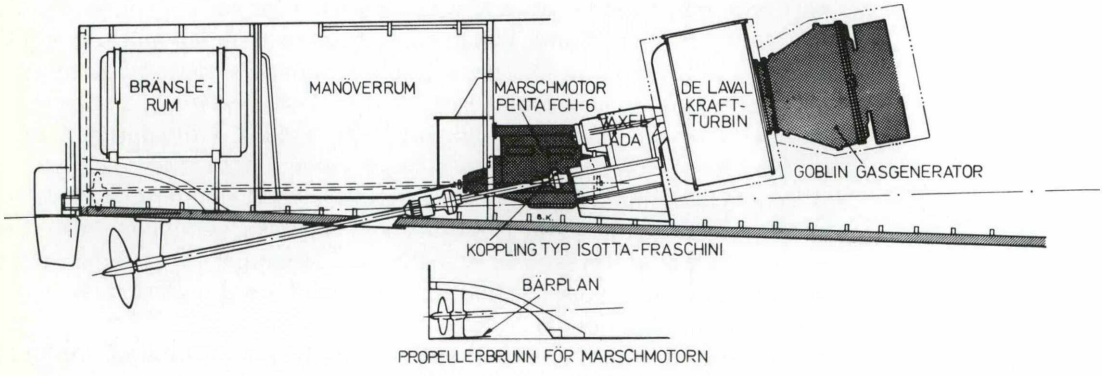
Till sjöss har gjorts en rad försök att introducera gasturbiner för han-

delsfartyg. Efter oljekrisens chockhöjningar 1973 och de därefter följande enorma höjningarna av oljekostnaderna har dessa gasturbindrivna fartyg undantagslöst visat sig oekonomiska jämfört med dagens dieselfartyg med uppladdade högeffektiva motorer. Flertalet gasturbinanläggningar installerade i containerfartyg, färjor och transportfartyg för naturgas har utbytts mot dieselanläggningar. Endast vid fartyg där stora effekter erfordras under kortare tid, såsom vid isbrytare i kombination med dieseldrivna marschfartanläggningar, synes gasturbinerna kunna hålla sig kvar.

Vid örlogsflottorna spelar ju bränslekostnaderna föga roll, däremot har låg vikt och ringa utrymmesbehov samt flexibilitet en avgörande betydelse. 1946 provade brittiska flottan sitt första gasturbindrivna krigsfartyg, en kanonbåt med en effekt av 1 850 kW. Bränsleförbrukningen visade sig emellertid vara förödande stor även för ett krigsfartyg. 1951 gjorde svenska marinen ett för de inblandade mycket intressant prov att införa jetmotorteknik på ett litet snabbgående fartyg. En av flygets uttjänta "Goblin"-jetmotorer installerades i motortorpedbåten T3 för drift av centerpropellern. Som marschaggregat utnyttjades två 50 kW Pentamotorer med propellrar arbetande i tunnlar. Gasturbinens kraftturbin drev mittpropellern över en kuggväxel. Då fartyget kom upp i fart tömdes automatiskt tunnlarna för backpropellrarna som därigenom lyftes ur vattenströmmen och frikopplades. Genom detta av marindirektören Curt Borgenstam patenterade arrangemang erhölls ett CODOG-maskineri (CODOG = *CO*mbined *D*iesel *O*r *G*as turbine machinery) utan frikopplingar och komplikationer. Man beräknade att man med gasturbinen skulle uppnå en fart av 40 knop. Installationen framgår av figur 12.

På den första provturen hösten 1951 inträffade en klassisk malör. Vid fullfartsprovet erhölls ingalunda några 40 knop. Vid körning över mätta milen uppmättes endast ungefär 20 knop. Vid diskussion om orsaken till det dåliga resultatet var alla experter eniga i, att felet måste ligga hos

12. Torpedbåten T3:s maskinarrangemang visande inbyggnad samt hjälpdieslarna med propellrar på ytteraxlarna i självtömmande propellerbrunnar.

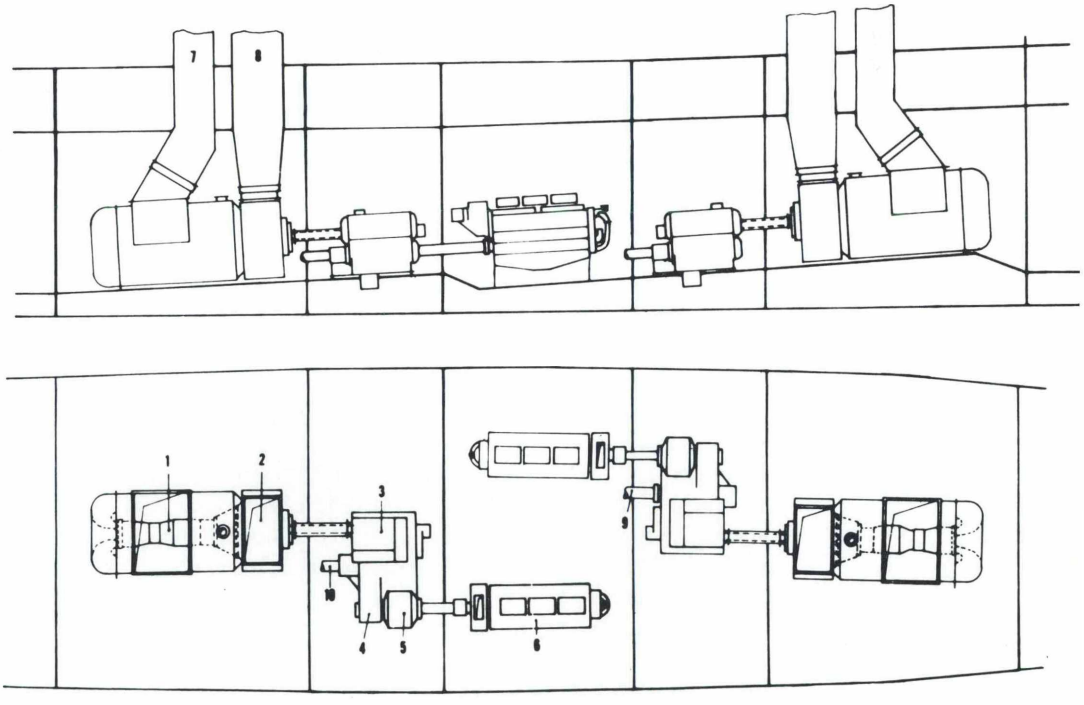


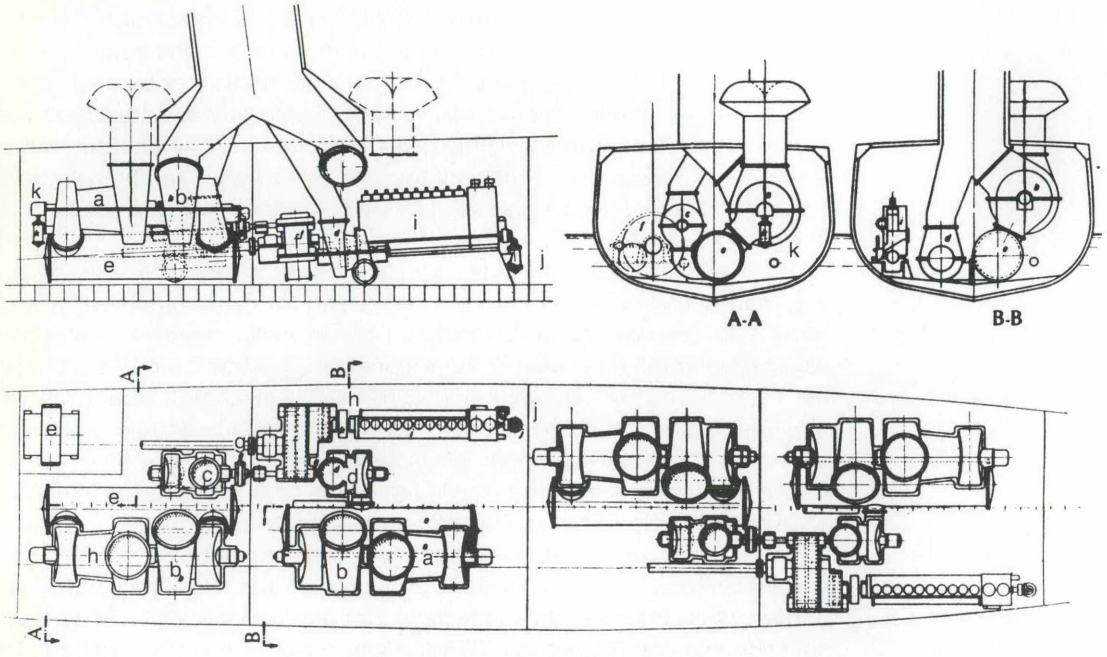
propellern, som antogs ha arbetat med mycket låg verkningsgrad och hög kavitation. En ny propeller framtogs och efter cirka ett halvt år gjordes en ny provtur. Vid första gången över mätta milen erhölls åter bara 20 knop, men nu fann man felet. Tachometern visade dubbla varvtalet. Det konstaterades att den elektroniska varvräknaren indikerade två gånger per varv i stället för en gång. Då "Goblin"motorn gavs tillräckligt med bränsle gick farten raskt upp, fartyget planade och vid fullt varvtal var farten med god marginal 40 knop.

Den svenska T3 var ingalunda världens första gasturbindrivna örlogsfartyg, men den slog på sin tid hastighetsrekord för gasturbindrivna fartyg. Först 1966 inleddes gasturbinepoken i den svenska marinen. Spicaklassens fartyg erhöll tre Bristol Proteus mariniserade jetmotorer. Dessa fartyg har visat sig mycket ändamålsenliga. Trots Spicaklassens ålder skall en utbyggnad ske under 80-talet med i stort sätt oförändrade arrangemang, men med de moderniseringar av gasturbinaggregaten som tillverkarna undan för undan åstadkommer. Sedan 60-talet har inga större snabbgående fartyg än Spicaklassen byggts inom svenska marinen.

Utvecklingen inom stormaktsmarinerna och Nato-ländernas flottor har däremot ingalunda kännetecknats av en sådan återhållsamhet. 1962 begärde danska marinen kompletta anbud för maskinerierna till två fregatter som skulle ingå i Natoflottan. STAL-LAVAL lyckades uppnå ett samarbete

13. "Peder Skrams" maskinarrangemang 32 500 kW, 1965/1966. 1. gasgenerator 2. kraftturbin 3. kuggväxel för dito 4. dieselväxel 5. hydraulisk koppling 6. dieselmotor 7. luftintag 8. skorsten 9–10. propelleraxel.





14. 27 000 kW gasturbinprojekt för jagare av 1939. a = Luftkompressor. b = Gasturbin för drift av a. c = Gasturbin på 6 600 kW med inbyggd backturbin för drift av propeller. d = Gasturbin på 6 600 kW utan backturbin för drift av propeller. e = Förbränningskammare, gemensam för b och c resp. d. f = Kuggväxel. g = Utryckbar fast koppling. h = Utryckbar elastisk koppling. i = Marschfart-dieselmotor på 1 100 kW. j = Hydraulisk generator. k = Hydraulisk motor för start av gasturbiner. l = Ekonomipanna.

med den amerikanska jetmotortillverkaren Pratt & Whitney och erhöll så småningom beställningen på västvärldens första stora CODOG-maskineri för krigsfartyg. Anläggningen var på 32 000 kW och bestod av två gasturbinaggregat från Pratt & Whitney med STAL-LAVAL kraftturbiner med kuggväxlar och KAMEWA-propellrar. Maskineriets utformning framgår av figur 13. Två dieselmotorer användes för marschfart upp till 18 knop. Dessa urkopplades då gasturbinerna vid högre effekter tog över belastningen. Provturerna avslutades våren 1966. Maskineriet visade sig utomordentligt ändamålsenligt. Det var mycket lättare än ett motsvarande ångmaskineri och marschmotorerna gav vid lägre farter långt bättre ekonomi än detta. Korvetterna "Peder Skram" och "Herluf Trolle" blev inledningen till att gasturbinerna accepterades som huvudmaskineri i alla västvärldens örlogsflottor. Vid tidpunkten för "Peder Skrams" provtur var det ytterst få invigda som visste att Sovjets maskintekniker redan 1962–63 gjort en rad prov med gasturbindrift i "Petya" klassens korvetter.* Med två gasturbiner vardera på 11 000 kW på ytteraxlarna samt med två växlade dieselmotorer

kopplade till mittpropellern kunde vid full fart 26 000 kW utnyttjas. Fartygen uppnådde genom detta CODAG**-arrangemang utomordentligt hög fart och förnämliga prestanda.

Bara kort tid efter "Petya"klassen uppträtt i Östersjön gjorde Sovjetflottan sin introduktion av sina första jagare med enbart gasturbiner med en installerad effekt av 70 000 kW på fyra axlar. Sovjet har efter dessa pionjärfartyg uteslutande byggt gasturbin- eller kärnkraftdrivna fartyg. En hel serie kryssare i "Kara"klassen med gasturbindrift och 90 000 kW har bl a tillkommit.

I ryska krigsfartyg i drift och under byggnad finnes nu en installerad gasturbineffekt av mer än 9 milj kW. USA och Storbritannien har endast halvhjärtat försökt inhämta Sovjets försprång och har nu en installerad gasturbineffekt av 5½ milj kW. Utvecklingen på området illustreras väl av figurerna 13 och 14. Figur 14 visar det ofullgångna projekt som författaren utarbetade för Brown Boveri 1939 bestående av fyra gasturbiner på sammanlagt 27 000 kW kombinerat med två dieselmotorer för marschfart. Gasturbinernas termiska verkningsgrad beräknades till 17 %. Peder Skrams maskineri uppnådde 28 %. Nybyggda amerikanska gasturbindrivna större krigsfartyg uppnår verkningsgrader på 35 %.

Man kan alltså konstatera att gasturbinerna helt revolutionerat luftfarten, att gasturbinuppladdade dieselmotorer är det helt dominerande fartygsmaskineriet samt att gasturbinerna helt utträngt ångmaskinerierna för krigsfartyg med undantag av vid vissa kärnkraftdrivna specialfartyg.

* Tyska marinen byggde 1962–1964 ett antal fregatter med CODAG-maskinerier i "Köln"-klassen bestående av Brown Boveri gasturbiner med en effekt av 2 × 9 000 kW. De var komplicerade och bränsleslukande och ansågs ej färdigutvecklade för sjötjänst.

** CODAG = *CO*mbined *D*iesel *A*nd *G*as turbine machinery.