

Cyrus B Meher-Homji
Bechtel Corporation
Houston, TX 77252

Erik Prisell
Defence Materiel Administration (FMV)
Stockholm, Sweden

Průkopnický vývoj proudových motorů Dr. Hanse von Ohaina - od HeS 1 k HeS 011

Dne 13. března 1998 zemřel ve věku 86 let spoluvynálezce proudového motoru Dr. Hans Joachim Past von Ohain. Jako mladý doktorandský student vymyslel a postavil demonstrační proudový motor. V roce 1936 se nechal najmout leteckou společností Heinkel a pod velkým tlakem, vyvíjeným Ernstem Heinkellem, zkonstruoval první letuschopný proudový motor na světě. Toto pojednání sleduje technické předchůdce vedoucí k prvnímu proudovému poháněnému letu dne 27. srpna 1939 s letounem He 178 a von Ohainovým motorem HeS 3B. Během jeho činnosti u Heinkela a poté u společnosti Heinkel-Hirth byl zodpovědný za řadu proudových motorů, ústící ve vyspělý motor druhé generace HeS 011 s tahem 2860 lbs. Tento článek je projevem úcty vynikajícímu vědci, který dosáhl revoluce v proudových motorech a jenž bude navždy vzpomínán jako vynálezce světového prvního létajícího proudového motoru.

1. Úvod

Brzy ráno 27. srpna 1939, pár dní před vypuknutím druhé světové války, se shromáždila malá skupinka lidí na Heinkelově letišti v Marienehe blízko Rostocku, aby byli svědky prvního letu letounu He 178 poháněného proudovým motorem a pilotovaného zkušeným pilotem Erichem Warsitzem. Mezi přítomnými byli E. Heinkel, von Ohain i mladý a skvělý konstruktér turbojetů, Max Hahn a Wilhelm Gundermann, jež pracovali v malém týmu, který vyvíjel tento světový první letounový jet pohon HeS 3B. Tento let, který trval přibližně 6 minut, změnil směr historie letounů a jejich pohonů. Popis práce Dr. Von Ohaina je prezentován technickými detaily návrhů jeho proudových motorů, vrcholícími v HeS 011, který byl považován za nepokrokovější proudový motor na konci 2. světové války.

1.1 Předchůdci. Dr. Hans von Ohain v Německu a sir Frank Whittle v Anglii, oba jsou považováni za spoluvytvářce proudového motoru, průkopníky proudové revoluce. Konstant [1], Schlaifer [2], von Ohain [3], Scott [4], Jones [5] a Meher-Homji [6] tuto práci dokumentovali. Whittle a von Ohain samostatně předvídali rychlost letu nad 500 mph v nadmořské výšce 30 000 stop, měli jako studenti revoluční myšlenky a vyvinuli svoje motory bez pomoci tradičních motorářských společností. Za účelem vývoje Ohainových proudových motorů byl vytvořen před a během 2. světové války historický pohled, jež je nutný k vysledování směru Ohainova myšlení a teoretického i praktického rozvoje, týkajícího se plynových turbín před 2. světovou válkou a také prozkoumat faktory, jež vedly Heinkela k podstoupení rizika vývoje proudových motorů.

1.2 Přehled vývoje proudových motorů v Německu. Proudový vývoj v Německu zpočátku obsahoval dva nezávislé programy, jež nebyly (přinejmenším na začátku) pod záštitou Německého ministerstva letectví (RLM¹). Jak je typické pro změny v revolučních technologiích, nebyly tyto dva programy zahájeny tradičními výrobci leteckých motorů, ale započaly v Heinkelových leteckých závodech a u letecké společnosti Junkers. Konec konců oba tyto vývojové směry skončily u firmy Heinkel, ale jak uvidíme později, navzdory výtečné pozici v

oblasti vývoje proudových pohonů a letounů, nedovedl Heinkel jako průkopník proudového věku využít této své pozice.

1.2.1 Vývoj motorů podporovaných Ernstem Heinkellem. Von Ohain rozvíjel myšlenku svého proudového pohonu již jako doktorandský student na Univerzitě v Göttingenu. V roce 1934 dokončil výpočty prvotního návrhu, jež naznačovaly, že by bylo možno dosáhnout rychlosti 500 mph. Inicioval patentovou proceduru a rozhodl se postavit funkční model tohoto motoru. Společně s Maxem Hahnem, zkušeným strojařem a mechanikem a rozeným technikem, postavil svůj první model motoru, který byl sužován problémy se spalováním. Von Ohainův profesor R. W. Pohl přesvědčil von Ohaina k Ernstu Heinkelovi, legendárnímu výrobcí letadel, jehož Pohl znal a jež byl posedlý rychlou letovou rychlostí. Výsledkem bylo, že 24letý Ohain absolvoval pohovor s Heinkellem a jeho předními inženýry a byl u Heinkela zaměstnán.

Ernst Heinkel vešel ve známost během 1. světové války, kdy byl géfkonstruktérem Hansa-Brandenburgských leteckých závodů a byl pověřen jako konstruktér široké palety typů námořních letounů. Heinkel založil svou vlastní firmu v roce 1922 a vyráběl několik slavných letounů. Jeho posedlost rychlostí byla vyvolána v září 1927, když navštívil Benátky a viděl tam proslulý závod o Schneiderův pohár. Když viděl přehlídku těchto rychlých letadel, tak se ho zmocnila mohutná touha stavět rychlé letouny [7]. U této události byl i Claudius Dornier, s nímž pozoroval vysoce výkonné motory Fiat, a který vyslovil směrem k Heinkelovi následující prorocká slova: "Když budeme mít stejné motory jako tyto, mohli bychom se také účastnit těchto závodů, ale díky způsobu šíření našeho leteckého přemyslu se tam zřejmě nikdy nedostaneme." Heinkel zmínil ve svých pamětech, že toto byl samozřejmě pravdivý výrok a že německé motory (jako výsledek šekáček, jež se projevily mezi lety 1918 a 1933) nikdy nedohaly zbytek světa zrušením výhody na poli aerodynamiky draků letounů. Toto Heinkelovo zklamání německým přemyslem leteckých motorů přetrvávalo a bylo jistě faktorem v jeho dalším záměru postojte ono nové směrem pojetí mladého von Ohaina o 9 let později.

Za příspěvní International Gas Turbine Institute (IGTI) THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS publikováno v ASME JOURNAL OF ENGINEERING FOR GAS TURBINES AND POWER. Článek byl uveřejněn v International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Indianapolis, IN, 7. 10. června 1999; ASME tisk 99-GT-228. Rukopis byl přijat u IGTI 9. března 1999; konečná revize přijata ASME Headquarters 3. ledna 2000. Spolupracující technický redaktor: D. Wisler.

¹ Německé národní ministerstvo letectví bylo známé jako Reichsluftfahrtministerium, zkráceně RLM.

Po svém opojení rychlostí zaměstnal Heinkel dvojhlavá Siegfrieda a Waltera Güntherovi. Bratři Güntherové byli skvělými a nadanými konstruktéry, stojícími za několika Heinkelovými v závodech vítěznými konstrukcemi a také za ladným designem proudového letounu vyvíjeného u Heinkela. Oni byli zodpovědní za slavný He 70 (Heinkel Blitz), jemuž získal osm mezinárodních rychlostních rekordů v roce 1933. Tento letoun byl vybavený motorem BMW o 600 koních, který tehdy představoval technologické opožďování za USA, Anglii a Francií. He 70 měl tak dobrou aerodynamiku, že ve skutečnosti dohnal při testování a převládání u Rolls Royce jejich 810 HP motor Kestrel.² Bratři Güntherové byli přítomni prvotnímu pohovoru s Heinkelem a znali omezení použití vrtule pro vysoké rychlosti, byli poté nadšení jeho proudovým konceptem.

Jak je podrobně popsáno níže, zaměstnal Heinkel von Ohain v roce 1936 a tento nadaný mladý fyzik mu pomohl v březnu 1939 vytvořit svůj první proudový motor pohánějící letoun. Von Ohain a Max Hahn začali pracovat v Heinkelově podniku v Marienehe v utajení a dostali instrukce vyvinout proudový motor tak rychle jak jen to bude možné s úspěšným, že pozemní testy by měly začít do jednoho roku. První motor byl označen jako HeS1 byl motor demonstrační, který pracoval na vodíkové palivo a byl úspěšně testován v březnu 1937. Pokračování vývoje von Ohainovým týmem vytvořil motor HeS 3B, schopný provozu a je poháněl historicky první letající proudového letounu He 178 dne 27. srpna 1939, několik dní před začátkem 2. sv. války Heinkel okamžitě informoval o této mimořádné události úředníky ministerstva letectví, ale setkal se s lhostejností. Německé ministerstvo letectví našlo Heinkelovi přestat se veškerým výzkumem proudového motoru, ale Heinkel, přesvědčený že jeho politické styky by mohly nakonec přinést ziskový kontrakt, udržel von Ohainův tým v práci na tužbojetu. O několik měsíců později byl Heinkelův návrh proudové stíhačky (He 280) přijat u RLM. Tento letoun byl poháněn dvěma jednotkami HeS 8A, zkonstruované Ohainem.³ Po prvním letu He 280 RLM dovolilo Heinkelovi získat továrnu Hirth Motoren a Heinkel tak získal plnou schopnost vyrábět vyspělé motory. Von Ohain se přesunul ke společnosti Heinkel-Hirth a pokračoval tam ve vývoji proudových motorů. RLM zrušilo program He 280 dne 27. března 1943 a vývoj HeS 8A byl RLM zredukován v polovině roku 1942 ve prospěch projektu Jumo 004 a BMW 003.

1.2.2 Vývoj proudových motorů zahájených u letecké společnosti Junkers. Jinde během období 1936 až 1939 pracovali na proudovém motoru inženýři letecké firmy Junkers pod vedením prof. Herberta Wagnera, skvělého leteckého konstruktéra, jež byl také odborníkem na vývoj parních turbín, který hledal směr vývoje proudových motorů a jež cítil, že právě tato oblast by mohla z Junkersu udělat přední leteckou společnost. V roce 1938 měl Junkers 30 konstruktérů a kreslířů pracujících na projektu v jejich Magdeburském závodu a v procesu vývoje byl demonstrátor, jež měl 15 stupňový axiální kompresor, spalovací komoru a dvoustupňovou turbínu. V této skupině pracoval i Max Adolf Müller, jež byl svého času asistentem prof. Wagnera na Technické univerzitě v Berlíně a byl nyní vedoucím projektu výzkumných prací Wagnerova proudového motoru. Později

RLM vyžadovalo, že vývojové práce na tomto motoru převezme Junkersova továrna leteckých motorů (Junkers Motoren v Dessau). Miller, který protestoval proti této organizačním změnám, opustil Junkers spolu s 12 členy svého týmu a v létě roku 1939 přeláhl k Heinkelovi, a tudíž tam přenesl i Wagnerův projekt motoru. V tomto jeho týmu byl zahrnut i Dr. R. Friedrich, významný aerodynamik kompresorů.

1.2.3 Oficiální program proudových motorů RLM (Německého ministerstva letectví). Obrazový přehled směru a chronologie vývoje německých proudových motorů lze vidět v obr. 1, který zahrnuje vyvíjené klíčové letouny. Také jsou ukázány letadla, jež byly plánovány pro zástavbu motoru druhé generace HeS 011.

V roce 1938 měli Helmut Schelp a jeho nadšený Hans Mauch v úmyslu na německém ministerstvu letectví (RLM) zavést vývojové programy motorů a snažili se u továren na letecké motory vyvolat zájem o jejich vývoj. Schelp si uvědomoval omezení pístových motorů pro vysoké rychlosti a usoudil, že proudový pohon by bylo řešení⁴. Schelp netužil o pokračujícím vývoji u Heinkela nebo Junkerse. Převládající pocit tehdy byl, že účinnosti kompresoru a spalování byly příliš nízké, než aby byly použitelné v proudovém motoru. Nicméně Schelp znal tři hlavní projektanty kompresorů: profesoři Prandtl, Betze a Encke, kteří pracovali v Aerodynamickém výzkumném ústavu (AVA) v Göttingenu a jež byli úspěšní v konstrukci kompresorů na základě airfoil teorie. Schelp rozpoznal, že jejich práce by mohla poskytnout podnět, potřebný i vývoji praktického motoru.

V roce 1938 Schelp a Mauch navštívili 4 hlavní továrny na letecké motory i BMW, Junkers Flugmotoren, Daimler Benz a Bramo. Ředitel Junkersu Flugmotoren Otto Mader neochotně přijal kontrakt na malý vývojový projekt. On si nebyl vědom uvedeného Wagnerova probíhajícího programu u společnosti Junkers Flugzeugwerke. Daimler Benz odmítl Schelpovu nabídku kvůli financování. Bramo, obávající se, že budou brzy muset čelit tvrdé konkurenci v pístových motorech ze strany svého rivala BMW, souhlasila s provedením studie. BMW přijala kontrakt na výzkumné práce. Později během války společnost BMW vyvíjela motor 003 pod vedením Dr. Hermana Oestricha. Konec konců všechny vývojové práce německých turbojetů probíhaly pod kontrolou RLM. RLM vyžadovalo, aby všechny vývoj byl realizován v motorářských závodech.⁵ Ve společnosti Junkers letecké motory (Junkers Motoren nebo zkráceně Jumo) probíhaly práce na zámluvném konzervativním motoru Junkers Jumo 004 pod vedením Anselma Franze. Tento motor, který poháněl Me 262, byl svým prvním ve velkém počtu vyráběným proudovým motorem a byl popsán Meher-Homji [8]. Jak bylo uvedeno, Heinkel získal povolení k nákupu společnosti Hirth, která mu poskytla přístup k technologii výroby motorů. Oba, von Ohainův a Millerův program motorů byly přesunuty ke společnosti Heinkel-Hirth v podstatě pod kontrolou RLM.

2. Von Ohainova poštátelní práce

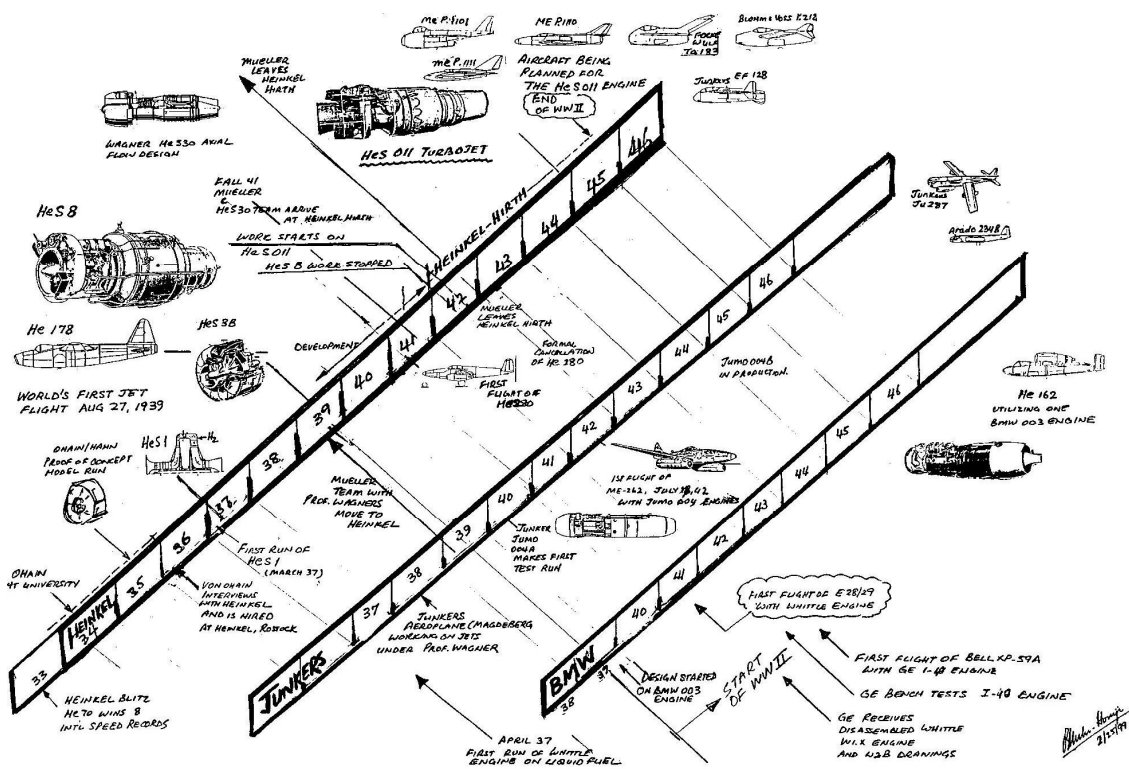
Von Ohain rozvíjel myšlenku svého proudového motoru už když byl studentem Univerzity v Göttingenu když pracoval na získání Ph.D. pod uznávaným profesorem Pohlem. Během letu tímto motorovým letounem Junkers byl von Ohain zdušen velkým hlukem a vibracemi, mající původ ve spalovacím motoru a instinktivně cítil, rekombinace aerodynamického letounu by byla výhodnější (v estetickém smyslu) s plynulým prouděním aerodynamického motoru. Pobídnutý tímto poštátelním

² Heinkel se ve skutečnosti snažil sjednat dohodu s Britským ministerstvem letectví k výměně licence výroby He 70 za licenci výroby a vylepšení motoru Rolls Royce v Německu. Tato dohoda nebyla odsouhlasena Německým ministerstvem letectví, jež Heinkel, upozornil, že vývoj německých leteckých motorů bude brzy předsídlit zahraniční výrobci leteckých motorů.

³ Devět prototypů He-280 bylo postaveno a na jaře 1942 byla perspektiva tohoto letadla přeznává pro Jumo 004, jež však v té době trápily problémy s vibracemi lopatek kompresoru. Jakmile tyto problémy byly vyřešeny Franzem a Betelem, jevil se jako lepší Me 262 než He 280 a tudíž bylo rozhodnuto o jeho výrobě.

⁴ Schelp byl si byl vědom práce Armegauda a Lemala zveřejněné před rokem 1910, ve které navrhli myšlenku proudového pohonu.

⁵ Mauch ve skutečnosti navrhnul, že Heinkelův tým pro proudový motor základem proudového vývoje, vytvořeného u zavedené společnosti Daimler-Benz, což Heinkel odmítl.

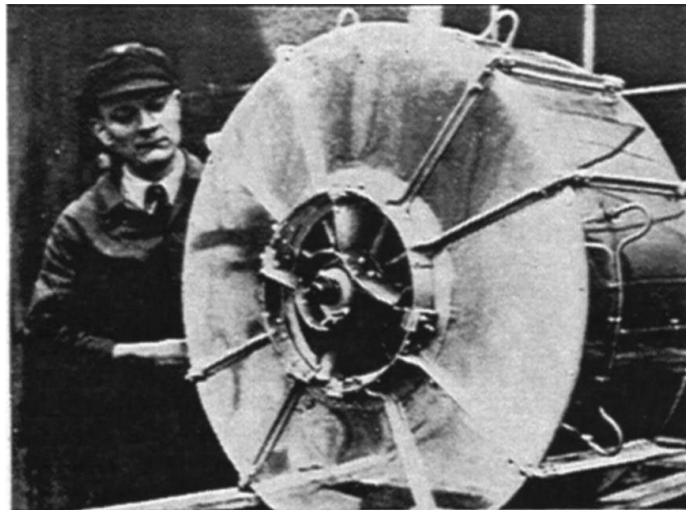


Obr. 1 Lásavá osa ukazuje vývojový program německých proudových motorů a provozovaná i plánovaná proudová letadla

pocitem na podzim 1933 začal uvažovat o procesu stálého aerodynamického toku vyžadujícím projekt založený na modifikované ĀNernstův turbíně a jejím předloženém výpočtu, naznačujícím že takový systém by měl velké výhody, pokud jde o poměr výkonu k hmotnosti. Jeho projektem byla naplněna jednoduchost funkčního modelu. On si vybral projekt s odstředivým kompresorem a turbínu s radiálním prouděním k minimalizaci možných problémů. Uč i v této jasné době rozpoznal von Ohain důležitost co nejméně lehké plochy při použití axiálního kompresoru, ale rozhodnul se k jednodušší konstrukci pro první modely.

V roce 1934 byly dokončeny základní výpočty této konstrukce, jež naznačovaly na základě tlakového poměru 3:1 možnou rychlost 500 mph a vstupní teplotu 1200 až 1400 °F. Aťkoliv byla spotřeba paliva vysoká, tak von Ohain kalkuloval s tím, že hmotnost takového proudového motoru by mohla být asi čtvrtina tehdy běžného leteckého pohonu. Zahájil tedy patentové procedury a rozhodl se na vlastní náklady postavit funkční model tohoto motoru. Von Ohain rozvinul spolupráci s Maxem Hahnem, strojírenským odborníkem a mechanikem a nadaným technikem,⁷ který byl hlavním mechanikem v opravárenské dílně automobilů Bartells a Becker v Göttingenu a kde nechával von Ohain opravovat své vř. Von Ohain ukázal Hahnovi své prvotní skici a Hahn navrhl některá zlepšení k usnadnění výroby. Prototypový model byl Hahnem postaven a von Ohainovy pořádkové náklady byly odhadnuty na 1000 marek. Motor je vyobrazen na obr. 2. Tento motor nemohl sám běžet kvůli problémům se spalováním, ale podal určitý výsledek v podobě odlehčení startéru.

Ohain provedl měření rozložení teploty a tlaku a popsal je Hahnovi, jež byl obvykle přesný a skeptický, ale v tomto případě



Obr. 2 Prototypový model (1934), který nebyl autonomní

byl velmi optimistický kvůli odlehčení startéru a vysoké rychlosti plamene vycházejícího z roury proudového motoru!⁸ Ohain si správně domníval, že spalování kapalného paliva by mohla být velkou výzvou a také že by překonání tohoto problému stálo velké finanční i technické prostředky.

Profesor R. W. Pohl⁹ z Göttingenské univerzity byl velkým, podporovatelem této mimořádné práce a povolil, aby byly tyto experimenty prováděny na půdě jeho institutu a byly von Ohainovi k dispozici přístroje a startovací motor. Přesvědčil se, že von Ohainova teorie byla správná a že tento koncept má budoucnost, a doporučil mu přímou finanční podporu, která je nutná pro další vývoj a projevil ochotu k napsání doporučujícího dopisu společně s výrobci leteckých motorů dle von Ohainova výběru. Von Ohain uvážlivě zvolil výrobce letadel Ernsta Heinkela, neboť si uvědomoval Heinkelovu posedlost vysokorychlostními letouny a že byl ochoten

⁶ Von Ohainem zpočátku prověřované koncepty nevyžadovaly pohyblivé zařazení k přivedení vzduchu do kontaktu s expandujícím plynem, ale byly problémy s přenosem tepla a ztrátami, započínaly myšlenku nahrazení pojetím kompresor-turbína.

⁷ Von Ohain měl vždy respekt před přirozenou technickou a praktickou dovedností Maxe Hahna, byl mužem velké skromnosti a vždy se zmiňoval o Hahnovi přesně jak ústně tak v dalších dokumentech. Max Hahn následoval Ohaina k Heinkelovi a těsně spolupracoval na vývoji prvních motorů až do konce války.

⁸ Jak bylo popsáno von Ohainem i bylo to jako plamenomet!

⁹ Prof. R. W. Pohl byl von Ohainův profesor pro jeho doktorát z fyziky. Von Ohain byl zařazen pod prof. L. Pradtla v oblasti aplikované mechaniky.

podstoupit urlité riziko.¹⁰ Další okolností tohoto jeho rozhodnutí byl ten fakt, že von Ohain mł rád Baltské moře a plachtlní a Heinkelův závod v Rostocku byl v tomto ohledu ideální. Von Ohain intuitivně rozpoznal, že by se tradiční motorářské společnosti bránily jeho revolučnímu projektu, který předkládal.

3 Práce na vývoji turbomotoru u společnosti Heinkel

V únoru 1936 napsal Pohl Heinkelovi a výsledkem bylo, že byl 24letý von Ohain předvolán do Heinkelova závodu na baltském pobřeží. Podle von Ohaina [9] během jeho diskuze s Heinklem v předvečer jeho celodenního rozhovoru si Heinkel vyslechl jeho nabídku a zeptal se ho listětna otázku, jaké problémové oblasti má jím navržený motor a přitom zkoumal, jestli mladý doktor má smysl pro realitu. Von Ohain mu naznačoval, že problém je vysoká spotřeba paliva, avšak že toto může být zlepšeno úsilím o pokračující vývoj.

Další den se von Ohain setkal s hlavními inženýry u Heinkela a poté následoval vyerpávající jednodenní pohovor, ve kterém obratně zodpovídal všechny otázky, a podařilo se mu přesvědčit Heinkela, aby ho zaměstnal.¹¹ V této skupině byli i Walter a Siegfried Güntherovi, Heinkelovi hlavní aerodynamici, kteří okamžitě rozpoznali důležitost proudového pohonu pro lety vysokou rychlostí. Zaměstnanecká smlouva von Ohain uzavřel v 15. dubna 1936.

3.1 Demonstrační motor HeS 1. Von Ohain a Max Hahn (kterého si von Ohain vyžádal zaměstnat) začali práce pod utajením ve speciální budově v Marienehe a dostali pokyny k vyvinutí proudového motoru tak rychle jak to bude možné s upřesněním od Heinkela, že pozemní testy proběhnou do roka. Tomuto projektu byl úmyslně dán neurčitý název *Äsander-Entwicklung* (Zvláštní vývoj) a práce započaly s týmem zahrnujícím Maxe Hahna a Wilhelma Gundermanna, nadaného Heinkelova konstruktéra a dvěma kreslíři. Heinkel udržoval tento projekt před RLM, před Luftwaffe a ostatními výrobci motorů v tajnosti.¹²

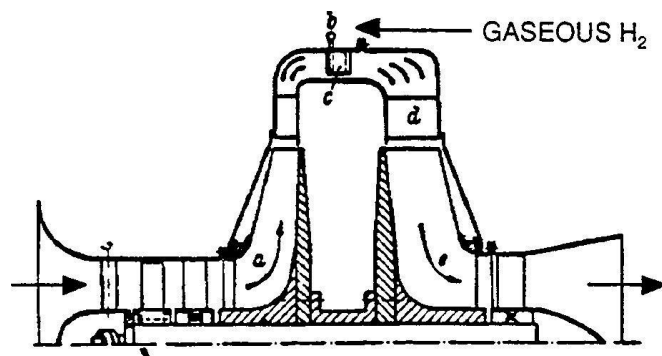
Poměrně dosti ambiciózní plán určený Heinklem nutil von Ohaina k odchýlení od jeho původního plánu, který předpokládal systematické vedení výzkumných prací a testů a řešení problémů se spalováním. Pod vlivem situace udělal vlnomé rozhodnutí zjednodušit běh motoru použitím vodíkového paliva, jež by bylo hnací silou takového projektu, rychle by Heinkelovi ukázal skutečně běžící motor¹³ a získal nějaký čas pro systematické zkoumání spalovacího procesu. Po tomto rozhodnutí započal souběžné zkoumání použití kapalných paliv a dokonce navštívil průmyslový veletrh v Lipsku za účelem získání pomoci ze strany výrobce hořáků pro konstrukci vysoce výkonné spalovací komory. Nenašel však žádnou podporu a realizoval pak tento obtížný problém za pomoci vlastního týmu. Práce pokračovaly

¹⁰ Toto rozhodnutí bylo naprosto správné, zatímco tradiční společnosti vyrábějící motory byly neochotné zkoumat proudové pohony, což Schelp později odhalil. Veškerý politický proudový vývojové práce v Německu byly provedeny leteckými společnostmi a ne továrnami na letecké motory.

¹¹ Lásť Heinkelových důvodů pro zaměstnání von Ohaina bylo zamezení odchodu k jeho dávnému konkurentovi i Messerschmittovi. Toto soupeření pokračovalo po celou válku v podobě závodů o výrobu první proudové stíhačky. Například na přelomu let 1940/1941 se Messerschmitt v důsledku své politiky opozdil o několik měsíců a nezískal akvizici Hirth Motoren GmbH [2].

¹² Hans Mauch z RLM opravdu navštívil Heinkela v létě 1938, o jeden rok dříve před prvním proudovým poháněným letem. On byl svědkem linnosti demonstračního motoru na vodíkové palivo. A toho ho pomohlo přesvědčit o potřebě proudového motoru k dosažení vysokých rychlostí.

¹³ Důležitý příznak novátorů je poznání, že konstrukční kompromisy jsou často nutné pro úspěch a že mnohdy technicky elegantní projekt nemusí vést k dlouhodobým úspěchům. Jak Dr. Von Ohain tak Sir Frank Whittle měli toto na paměti.



Obr. 3 Demonstrační HeS 1 pracoval na vodíkové palivo

s von Ohainovou podmínkou, pod jeho celkovým technickým vedením rozpracovat motor a osobně provést termodynamickou studii, Gunderman bude pracovat na mechanické konstrukci a analýze namáhání a Hahn bude mít na starosti výrobní postup a spalování.

Návrh HeS 1¹⁴ je vyobrazen na obr. 3. Skládá se ze zády k sobě umístěného radiálního kompresoru a turbíny s radiálním vstupem. Průměr rotoru byl 12 palců. Odstředivému kompresoru předcházela axiální vstupní stupeň. Vodíkový hořák sestával z velkého počtu dutých listů s tupým ostřím, umístěných uvnitř vzduchového kanálu mezi kompresorem a radiální turbínou. Tento motor byl vyroben v podstatě z ocelového plechu v závodě v Marienehe a disky byly zhotoveny v sousedních loděnicích. Motor pracoval rychlostí 10 000 otáček za minutu a vytvářel tak 1,1 kN (250 lbs). Von Ohainovo rozhodnutí použít vodík jako palivo bylo moudré, když se u demonstračního spalovací komory nevyklytly žádné závažné problémy s vysokou rychlostí plamene a vysokým pásmem spalování vodíku. To rovněž pracovalo bezvadně i v extrémních podmínkách a během přechodného zrychlení i zpomalení.

Na jaře 1937 byl jednoho brzkého rána tento motor předveden před Ernestem Heinklem a to mělo zásadní vliv na pozici von Ohaina u Heinkela. Mladý von Ohain byl už nyní pevně zaveden jako vynikající inženýr a jeho důležitost u Heinkela stoupala. Dr. Von Ohain sjal stálou smlouvu a byl jmenován vedoucím vývoje proudových pohonů u firmy Heinkel. Po tomto úspěšném testu Heinkel tvrdě tlačil na letuschopný motor pracující na kapalném palivu. Toto vedlo k návrhu a vývoji motoru HeS 2¹⁵ a konečně k motoru HeS 3.

3.2 Návrh a vývoj motorů HeS 3A a HES 3B. V květnu 1937 po testu HeS 1 se zintenzivnily práce na vývoji na spalovací komoše. Program výzkumu spalovacích komor zahrnoval následující prvky [3]:

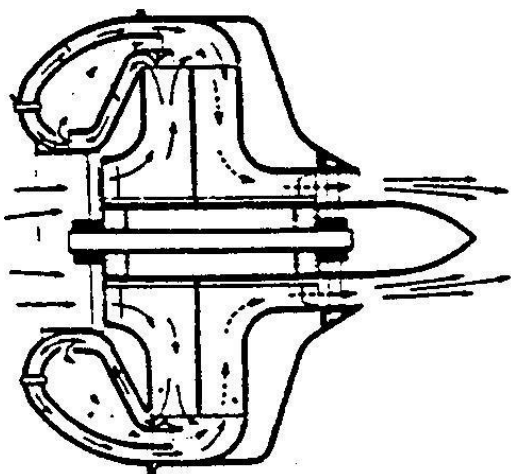
- instalace 2 HP ventilátoru s kontrolovaným obtočím k umožnění testování
- zkoumání části prstencové komory ke zhodnocení vlivu tvaru spalovací komory, mechanismu udržení plamene a jeho optimalizace pro minimalizaci tlakových ztrát¹⁶, vyvíjení palivových par a vstřikovávání do spalovací komory elektrickým ohříváním
- studie rozpražování

V roce 1938 byla vyvinuta spalovací komora s výbornými provozními charakteristikami. Tato komora používala odpařené palivo, ale byly tam stále potíže s rozpražováním, jež byly ale vyřešeny.

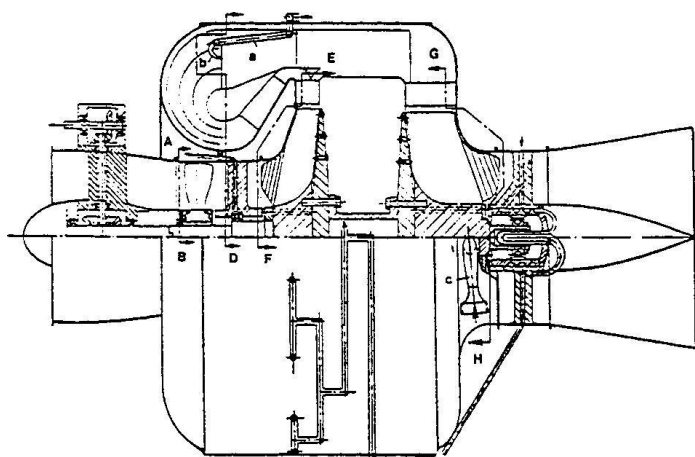
¹⁴ Označení znamenalo, že He=Heinkel, S=Strahltriebwerk=proudový motor. Stejně označení platilo i po Heinkelově zakoupení firmy Hirth.

¹⁵ HeS 2 měl stejné komponenty turbosoustrojí, jako měl HeS 3, ale v komoše spaloval vodík.

¹⁶ Vzhledem k tomu, že tyto dílce byly průměrově malé, byla v důsledku boční síly redukována použitelnost těchto testů.

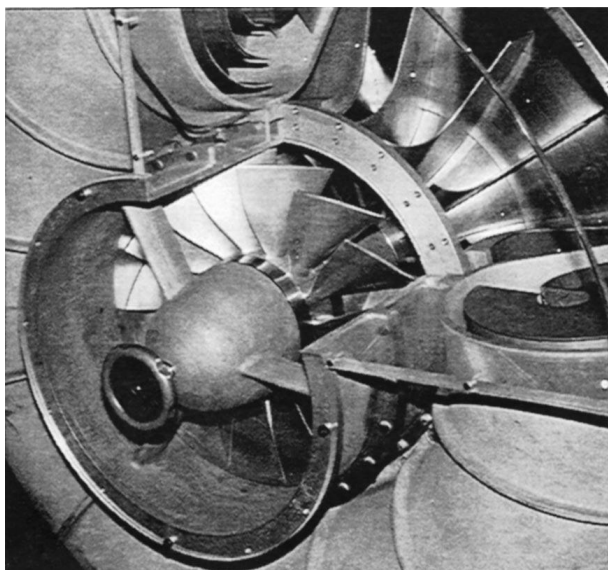


Obr. 4 Hahnův patentový výkres ukazuje spalovací komoru, jež se nachází před odstředivým kompresorem

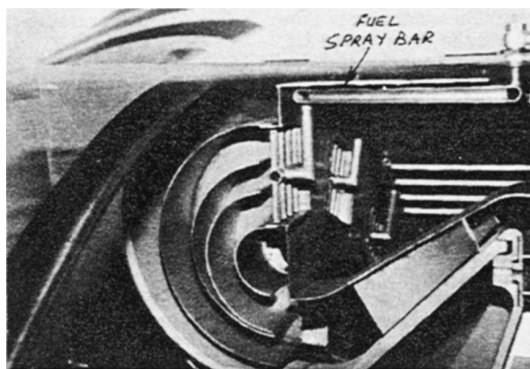


Obr. 5 Úspořádání leteckého motoru HeS 3B [10]

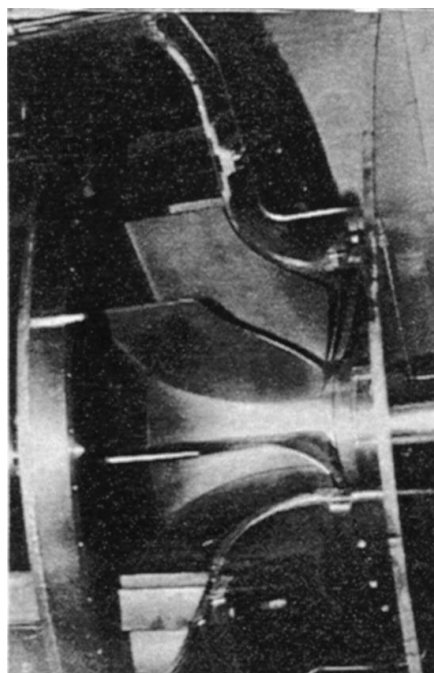
Vývojové práce letuschopného motoru (označeného HeS 3) začaly v květnu 1937 a v září 1937 navrhl Max Hahn myšlenku úspořádání spalovacích komor ve velkém nevyužitém prostoru před odstředivým kompresorem, tento koncept by redukoval velikost hřídele a hmotnost motoru. Dr. Von Ohain byl zaujatý Hahnovou myšlenkou a podpořil ho v podání žádosti o patent a tento nápad byl zařazen do návrhu von Ohainova motoru. Patentový výkres je vyobrazen v obr. 4 [10].



Obr. 6 Vstupní část HeS 3B ukazuje ventilátor a odstředivý kompresor

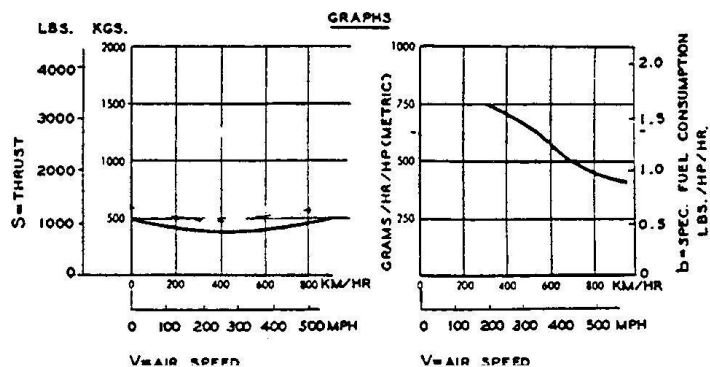


Obr. 7 Spalovací sekce motoru HeS 3B

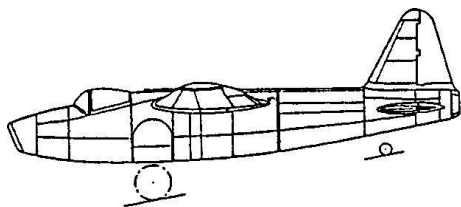


Obr. 8 Turbína s radiálním tokem motoru HeS 3B

První HeS 3A byl testován v roce 1938, ale neposkytoval potřebný plánovaný tah a vyústil v HeS 3B. Tento motor byl pokusem o zvýšení průtoku v důsledku vyčíslení poměru náboj/spotřeba a von Ohain minimalizoval vstupní ztráty použitím předsazeného stupně, jež kromě napomáhání zvyšování tlakového poměru rovněž poskytuje kontrolované víření a tudíž zmenšení vstupního relativního Machova čísla a zúžení vstupu lopatek. Náčrten motoru pro letovou zkoušku je na obr. 5 [11]. Vstupní část HeS 3 je vyobrazena na obr. 6. Obepínající spalovací komora je na obr. 7 a radiální vstup turbíny je ukázán na obr. 8. Motor mohl otáčet 13 000 ot/min a hmotnost 360 kg (793 lbs) a jeho plocha 0,68 m² (7,31 sq. ft.). Obrázek 9 ukazuje výkonové charakteristiky tohoto motoru prezentované Carterem [12].



Obr. 9 Výkonová charakteristika HeS 3B



Obr. 10 He 178 i světlový první proudový poháněný letoun

4 He 178: první proudový letoun na světě

Projekt He 178 vedl Dr. Heinrich Hertel a pracovala na něm dvojice Güntherovi. Základní design byl navržen Waltrem Güntherem, ale po jeho tragické smrti v dopravní nehodě v září 1937 byla tato práce přenesena na Heinricha Helmbolda a Siegfrieda Günthera, kteří ponechali koncept Walthera Günthera nezměněný. Tento letoun používal k pohonu motor HeS 3. He 178 (obr. 10) byl malý hornoplošník o rozpětí 7,2 m (23 stop a 7 palců) a o délce 7,48 m (24 ft 6 in). Křídla byla převážně dřevěné konstrukce s malým vzepětím. Vzduch pro jediný HeS 3B vstupoval do předního vstupu a postupoval do motoru kanálem, jež probíhal pod pilotovým sedadlem. Palivová nádrž byla uložena za sedadlem pilota. Letoun měl plnou hmotnost 1950 kg (4295 lbs) a byl konstruován na maximální rychlost 640 km/h (498 mph) u hladiny moře.

Dne 27. srpna 1939 kolem 4 hodiny ráno provedl He 178 pilotovaný Erichem Warsitzem historický 6minutový let z Heinkelova letiště v Marienehe. Po této historické události následoval velký jásot. Heinkel kvapně informoval RLM o tomto úspěchu, ale setkal se s netečností, když mělo RLM více naléhavějších problémů při přípravě na válku, která započala za několik dní. Později Heinkel zařadil předvedení He 178, které sledoval Schelp, Milch a Udet. U letadla se vyskytla potíže s prosakováním paliva u palivového čerpadla nejprve před vzletem a Heinkel improvizoval žádostí zabavit tuto skeptickou skupinu, zatímco bylo palivové čerpadlo vyměňováno [5]. Nakonec bylo provedeno úspěšné předvedení, ale u zástupce Ministerstva letectví se projevil jen málo nadšení.

Toto byl první letoun na světě využívající proudový motor a byl to rovněž první zkušenost s nasátím ptáka do motoru!¹⁷ Z pohledu časového to bylo jeden rok před Caproni-Campini CC2¹⁸ a 20 měsíců před britským Glosterem E28/39, jež poprvé vzlétl s Whittleho motorem W1

5 Motor HeS 6

HeS 6 byl zlepšený motor HeS 3 se zvýšeným tahem na 2860 kg (1300 lbs) při 13 300 ot/min. Specifická spotřeba paliva byla v podstatě stejná jako u HeS 3. I když byl tento motor sám o sobě zdařilý, jeho kombinace s drakem He 178 dávala slabé výkony. Problém s drakem letadla a trvalý problém se zatahováním podvozku ztěžoval, že Heinkel He 178 stopnul a tento letoun nechal přemístit do Leteckého muzea v Berlíně kde byl později zničen při bombardovacím náletu.

6 Vývoj motoru pro stíhací letoun He 280

Krátce po předvedení He 178 před zástupci RLM Heinkel spustil vývoj dvoumotorové stíhačky pod označením He 280. Tento letoun nemohl použít motory HeS 3B pro jeho velký průměr a nízké výkony. V této době nicméně probíhal vývoj axiálního motoru (označeného HeS 30) pod vedením M. Müllera, jež přesehl k Heinkelovu podniku, prodával závažné vývojové problémy.

Bylo uznáno, že tento motor by nebyl vlastně přestavěn a von Ohain vzal na sebe riziko a navrhnul řešení označené HeS 8, které by využívalo radiální rotor podobný HeS 3B kombinovaný s axiálním lopatkovým difuzorem a tokem přímo přes spalovací komoru. Pro tento vývoj bylo k dispozici pouze 14 měsíců, když drak He 280 byl vyvinut rychleji než tento motor.

Je zajímavé prozkoumat historii Millerova motoru v kontextu von Ohainovy práce. Müller měl prvotní kontakt s Heinkellem a Dr. Von Ohainem počátkem roku 1939 když nabídnul přivést k Heinkelovi Wagnerův motor a jeho projektový tým. V té době Miller vyvolal dojem, že tento vývojový program byl zsetelně pokročilejší a Heinkel a von Ohain se domnívali, že tento program společně s jejich vlastním motorem HeS 3 by mohl Heinkela vynést na vedoucí pozici mezi výrobci proudových motorů. Müllera jeho tým byli Heinkellem najati a nastoupili v létě roku 1939. Wagnerův motor přijal označení HeS 30. Miller a jeho tým byli začleněni do skupiny pohonů Dr. von Ohaina a jejich úlohou bylo dokončení vývoje HeS 30. Dr. Von Ohain i Heinkel brzy pochopili, že tento motor není zdaleka v tak pokročilé fázi, jak naznačoval Miller. Heinkel velmi tlačil na úspěšné dokončení tohoto programu, zvláště když byl HeS 30 plánován jako hnací agregát pro stíhač He 280. Během jednání o kontraktu s RLM, který byl Heinkelovi nakloněn a jež poznal, že Heinkel potěšuje zvýšit potenciál výroby motorů a získat kvalifikované odborníky pomocí zavedené motorářské společnosti, udělal s Heinkellem gentlemanskou dohodu, že když se zdaří let He 280 před dubnem 1941, mějte zakoupit společnost Hirth Motoren ve Stuttgartu.

Ke konci roku 1939 pokračoval HeS 30 velmi pomalu a Heinkel, šetřící tento nepřijatelný dopad na program He 280, pověřil Dr. Von Ohaina rozpracováním záložního řešení. Řešení von Ohaina, pojmenované HeS 8A, byla konstrukce založená na HeS 3B ale s axiálním difuzorem a přímým tokem spalovací komorou. Na program tohoto motoru byl uzavřen s RLM kontrakt a tento motor dostal poprvé označení německého proudového motoru 109-001. To nebylo bez rizika, protože specifikaci letounu omezoval průměr motoru a tudíž funkce axiálního difuzoru a účinnost dohromady se spalovací komorou s přímým prouděním se stávala poměrně kritickou. Načítí pro Heinkela von Ohainův HeS 8 se setkal s minimem požadavků a byl přestavěn vlastně pro první let He 280, který se odehrál v závěru března 1941. Program HeS 30 stále trpěl několika problémy včetně nevhodného vztahu mezi kompresorem a turbínou. A tak díky von Ohainovu HeS 8 letěl He 280 podle plánu a RLM dovolila Heinkelovi zakoupit společnost Hirth Motoren, který pak mohl Millerovu skupinu pomoci s vývojem HeS 30.

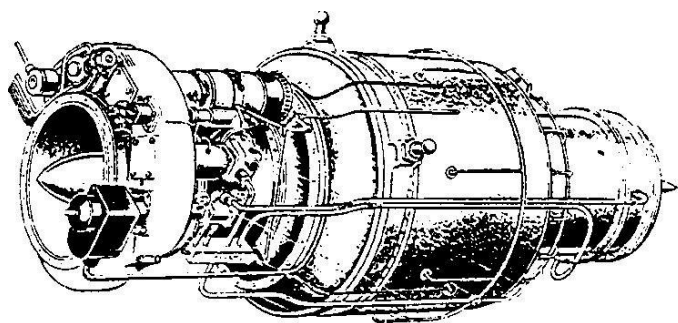
7 Popis motoru HeS 8A

HeS 8A (označení RLM 109-001) byl konstruován se stanoveným cílem uvedeným výše a byl postaven na základě motorů HeS 3 a HeS 6. Změnění jeho průměru bylo dokonale provedeno předlínáním difuzoru kompresoru do axiální podoby a spalovací komora byla provedena pro přímé proudění jak je ukázáno na obr. 11. Hlavní části tohoto motoru jsou zmíněny v tabulce 1.

Koncept HeS 8A zahrnuje 14 lopatkový axiální ventilátor mající profilované lopatky které byly vyrobeny kování z hliníkové slitiny. Ten byl následován 19 lopatkovým radiálním rotorem smíšené konstrukce skládající se z lopatek z hliníkové slitiny uložených na ocelovém náboji a zadní bočnicové desky. Po průtoku spalovací komorou proudila tekutina do 14 lopatkového radiálního turbíny, která sestávala také z ocelových lopatek na ocelovém náboji. Hřdel kompresor-turbína byl uložen ve dvou ložiskách, jedno mezi ventilátorem a rotorem a druhé za turbínou.

¹⁷ Načítí to byl malý ptáček, který nepředstavoval závažný problém.

¹⁸ Tento letoun používal systém ventilátoru v kanálu, ale využíval pístový hnací kompresor a tím pádem to nebyl opravdový turbojet.



Obr. 11 Motor HeS 8

Tabulka 1 Hlavní části turbojetu HeS 8

PARAMETR	MOTOR HeS 8
Otáčky	13 500
Hmotnost	380 kg
Čelní plocha	0,47 m ²
Specifický tah	18,5 kN/kg
Specifická spotřeba paliva	0,163 kg/Nh

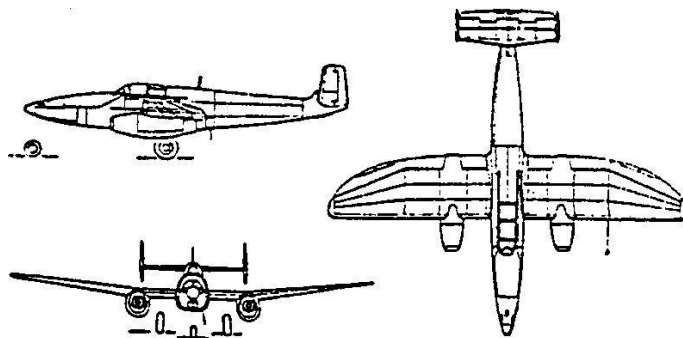
Spalovací komora byla s přímým proudným prstencovým provedením s výústním kompresorem přes dvě sady difuzorových lopatek před vstupem do komory. Odpadový palivový systém vstříkával palivo do komor pomocí 16 sad osmi trysek, zahrnujících dohromady 128 trysek. Každá tryska byla trubka o průměru asi 1/16 palce. Zpočátku nebyly pokusy s vytvořením nějaké dodávky sekundárního vzduchu, ale pozdější modely již taková opatření měly. Hnací tryska měla pevný průřez a výfuková trouba byla vestavěná do He 280. Přesný počet skutečně vyrobených motorů tohoto typu není znám, ale několik verzí postaveno bylo.

I když byl HeS 8A dobrý motor, byl jeho výkon pro He 280 na hranici dostatečnosti a na to doplatil na rozdíl od motoru Jumo 004, jež byl vybrán pro výrobu proudové stíhačky Me 262. Jestliže výkony, pokud jde o tak a spotřebu paliva a délku byly lepší,¹⁹ měl motor HeS 8A také problém, týkající se radiální turbíny, která představovala technologický pokrok v lase a celková potřeba strategických materiálů byla vyšší než pro axiální chlazené lopatky Juma 004. Následkem toho rýžet tahu pomocí zvýšení vstupní teploty turbíny byl u HeS 8A omezen nepoužitím strategických materiálů jako např. nikl. Lopatky radiální turbíny také trpěly únavovými poruchami a problémy s upevněním lopatek k náboji.

8 Světová první proudová stíhačka He 280

He 280 byl elegantní dvoumotorový letoun, vyvinutý Robertem Lusserem.²⁰ Byl navržený jako celokovový středoplošník, poháněný dvěma proudovými motory, umístěnými v gondolách pod křídly. Křídlo mělo přímou náběžnou hranu a od motorů mělo vzepětí. Ocasní část se skládala z poněkud výše uložených vodorovných ocasních ploch a svislých kormidel na obou jejich koncích. Pozdější varianta měla ocasní plochy do V. Výzbroj v přední části spočívala ve třech 20 mm kanónech. Letadlo mělo rozpětí 20 m (40 stop) a délku 10,04 m (34 stop). Samotné He 280 mělo revoluční konstrukci s tříkolovým podvozkem a výškovým sedadlem na stlačený vzduch. V březnu 1941 prodal první zkušební letoun 40 bezmotorových letů a 30 března 1941 vzletl prvním motorovým letu, poháněný von Ohainovými motory HeS 8 s test pilotem Fritzem Schäfferem. Motory byly nezakrytované kvůli únikům paliva,

které byly zaznamenány před vzletem. 5. dubna 1941 byl letoun úspěšně předveden před úředníky RLM. Letoun He 280 rovněž vzletl k testovacímu souboji s Focke-Wulfem 190.



Obr. 12 Elegantní dvoumotorová stíhačka He 280, poháněná von Ohainovým motorem HeS 8

Zajímavou historku o He 280 podal Jones [5]. Právě před vzletem testovacího pilota Badera bylo Robertem Lusserem použito malé kladivo. Lusser omluvně vysvětlil Baderovi, že to zatím není nějaký prostředek k opuštění kokpitu, ale že pokud by se dostal do nebezpečí, mohl by toto malé kladivo potřebovat. He 280 je vyobrazeno na obr. 12.

9 Zakoupení firmy Hirth Motoren a vytvoření Heinkel Hirth

Práce u Heinkela dávala von Ohainovi úplnou technickou svobodu a schopnost zvolit si svou vlastní cestu bez omezení související s financováním nebo testovacím vybavením či zasahování ze strany RLM. Nadto měl přímou a naděnou podporu vlastníka této společnosti. Toto bylo vynikající prostředí pro inovace prvotních motorů, ale když bylo potřeba obrátit se směrem k produkci, tak nevýhody práce pro společnost vyrábějící draky letounů se začaly projevovat. Nastal nedostatek odborných znalostí na poli vývoje motorů v oblastech materiálů, vibrací lopatek, aeromechaniky a výrobních technologií. Heinkel si přál zakoupit výrobce motorů k pozvednutí své pozice jako motorářské společnosti a získání potřebných technických pracovníků.

Po předváděním letu He 280 konečně Heinkel obdržel souhlas s nákupem Hirth-Motoren²¹, který měl dobrou pověst jako výrobce pístových leteckých motorů a turbokompresorů, sídlící v Zuffenhausenu poblíž Stuttgartu. Tato akvizice byla doprovázena politikou a Heinkelův rival Messerschmitt se v této věci opozdil o několik měsíců.²² S nákupem Hirthu Heinkel získal přístup k technickým kapacitám a výrobním znalostem této malé, ale dobře známé společnosti na výrobu motorů.

Oficiální název této společnosti když Heinkel přezval Hirth Motoren býval Ernst Heinkel a.s. i závod Hirth Motoren a zkráceně se nazýval Heinkel-Hirth. Je zajímavé poznamenat, že když se během konference v roce 1978 zeptali, jakou jedinou věc by von Ohain během jeho politických vývojových kroků požíadoval, tak oznámil, že nejvíce byla potřeba odborných znalostí v oblasti vibrací lopatek, kterou dostal ze společnosti Hirth v podobě Dr. Benteleho²³ [13].

Po získání společnosti Hirth Heinkel začal přesun svého týmu proudových motorů do Zuffenhausenu. Müller a jeho axiální

²¹ Hirth-Motoren GmbH byla vlastněná Hellmuthem Hirthem a byla založena roku 1931. Samotný Hirth zemřel v roce 1938.

²² Heinkelův přítel Udet v Luftwaffe nyní uskutečňoval to, že Luftwaffe když nemohla udržovat krok se spojeneckým leteckým vývojem, tak volal po radikálních technologických inovacích. Udet spáchal sebevraždu v roce 1941.

²³ Dr. Max Betele byl v té době hlavním odborníkem v Německu na aeromechaniku a vibrace lopatek. Na podzim roku 1943 vyřešil složitý problém poškození lopatek na motoru Junkers Jumo 004.

¹⁹ Axiální motor Jumo 004 byl nicméně lepší oproti HeS 8A v tahu na jednotku čelní plochy.

²⁰ Heinkel si najal Roberta Lussera odcházejícího od Messerschmitta. Lusser dokončil předchozí vývojové práce na Me 262.

motor HeS 30 jako první pšjeli na podzim 1941. Krátce poté se v roce 1942 rovnŤ k Heinkel-Hirth pšmístil von Ohain a jeho propulsní tým. Von Ohain okamŤitŤ navázali skvŤlé pracovní vztahy s Hirthovými inŤenýry a společný tým ťzce spolupracoval na vývoji motorŤ. Von Ohainova genialita, skromnost a ťestnost ihned zpŤsobilo zlepŤení situace mezi Hirthovými inŤenýry.

Na druhé stranŤ Miller nebyl ochoten pšjmout pomoc pro svŤj problematický axiální stroj HeS 30 [14]. Motor HeS 8 byl ve stádiu, kdy byl pšřpravovaný pro výrobu a Hirthovi pracovníci k tomuto ťkolu také pššpŤli. V ťervenci 1942 uŤ HeS 8A blŤel bezvadnŤ ale tehdy Me 262 a jeho motory Junkers 004 uŤ byly vybrány, aby se staly prvními sériovŤ vyrábŤnými proudovými motory pro Luftwaffe. Nakonec byly programy HeS 8, HeS 30 a stŤhací letoun He 280 oficiálnŤ zruŤeny zaŤátkem roku 1943. Schelp z RLM rozhodl, Ťe von OhainŤv týmu Heinkel-Hirth má zaŤít pracovat na proudovém motoru druhé generace HeS 011. V tomto dŤŤegitém okamŤíku Heinkel, jenŤ mŤl v prvních letech války prominentní pozici v proudových motorech a letecké technologii, nyní ztratil svou dominantní pozici.²⁴

10 Návrh a vývoj motoru Heinkel-Hirth HeS 011

V roce 1942 poskytlo RLM Heinkel-Hirthovi kontrakt na druhou generaci proudového motoru oznaŤeného jako HeS 011 (ozn. RLM 109-011), který poskytoval velký krok vpšed ve specifickém výkonu dalších výkonových parametrech. Specifikace tohoto motoru byla následující [13]: max. tah 12,75 kN s nárŤstem na 14,7 kN, hmotnost pod 900 kg, tlakový pomŤr 4,2:1, výŤkový dostup 15 km, specifická spotšeba paliva 1,4 lb/lb-hod. Dr. Von Ohain byl zodpovŤdný za vývoj a Dr. Max Betele zodpovídal za konstrukci komponent a šŤdil vývoj kompresorové a turbínovŤ části motoru.

KdyŤ Bentele podával zprávu [14] v prosinci 1944 o max. výkonových parametrech dosaŤených na motoru, byl tah 13 kN pš 10 205 ot/min. Hlavní detaily první generace motoru Jumo 004B, který byl vyrábŤn a tento pokroŤilý motor, vyvíjený u Heinkel-Hirth jsou porovnány v tabulce 2. Fotografie tohoto morou je na obr. 13 [14] a nákras je znázornŤn na obr. 14 [15].

10.1 Kompresorová ťást. Koncept a aerodynamická konstrukce kompresoru byla provedena Dr. Von Ohainem. Kompresor mŤl jednostupŤový axiální pšedstupeŤr následovaný diagonálním stupnŤm kompresoru²⁵ (smíŤeného toku) a pak tš symetrické (s 50 procentní reakcí) axiální stupnŤ. KdyŤ vzduch opoušŤl první axiální pšedstupeŤr, byl prstencový kanál redukován proudnicovým krytem hšdele k diagonálnímu kompresoru. Kombinace diagonálního stupnŤ s axiálními stupni byla dŤmyslnŤ operaŤnŤ vyrobena jako velmi plochá a poskytovala nárŤst kapacity bez pouŤití promŤhlivé geometrie, jeŤ by byla vyŤadována pro vŤŤí tlakové pomŤry.

Dvojitý pláŤš vstupní karotáŤe slouŤí dvojí funkci ť narovnání toku vzduchu a uložení pšřsluŤenství jako je olejová nádrŤ a mazací olejové ťerpadlo. Jak ohšřtý vzduch, tak elektrické vytápŤní pŤsobily proti námraze. Fotografie kompresorové ťásti je ukázána na obr. 15, který znázorŤuje stupnŤ smíŤeného proudŤní.

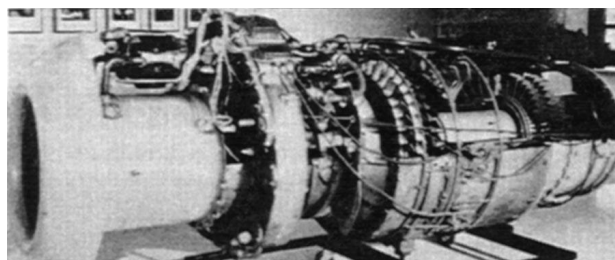
K vývoji tohoto kompresoru byl pouŤit 1600 kW elektrický testovací stav v Zuffenhausenu a parní turbínou pohánŤný 15 000 koŤový stav v DráŤgNanech. Tyto zašřzení dovolovala mŤření proudŤní, tlaku a rozdŤlení teploty v proudové cestŤ a jevŤ, se kterými se lze setkat pš návrhu smíŤeného toku kompres. ťásti.

²⁴ Na rozdŤl od Udetu nepodporoval Milch Heinkela a byl zklamáný Heinkelovým problémem, týkajícím se bombardéru dlouhého dosahu He 177. Tento letoun bylo fiasko, neboš na nŤ mŤl u RLM absurdní pŤžadavky. Navíc politická lobby v BerlŤnŤdnesnáŤela HeinkelŤv nezávislý styl.

²⁵ Toto bylo nazýváno Ákombination verdichterŤr.

Tabulka 2 Porovnání motorŤ Junkers Jumo004B a HeS 011

Parametr	Jumo 004 B	HeS-011 A
Výrobce	Junkers Motoren	Heinkel-Hirth
Tah	8927 kN	12,75 kN
Hmotnost	750 kg	885 kg
PomŤr tah/hm.	1,21	1,44
DŤlka	3860 mm	3343 mm
Pšední prŤmŤr	760 mm	805 mm
Rychl. prŤtoku vzd.	21,2 kg/sec	29 kg/sec
Tlakový pomŤr	3,1:1	4,2:1
OtáŤky/min.	8700	10205
Uspořádaní kompr.	8 st. axiální	diagon.+3 axial.
Uspořádaní turbíny	1 stupeŤr	2 chlazené st.
Spotšeba paliva	1,4-1,48	1,35 Lb/Lb tahu
Vstupní turb. teplota	775 °C	775°C

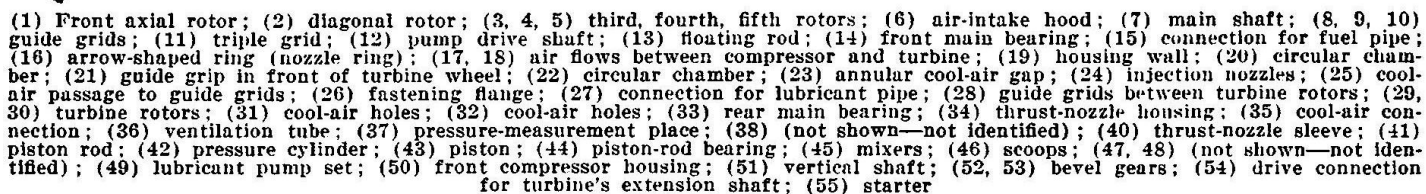


Obr.13 Motor Heinkel Hirth HeS 011

SpíŤe neŤ objevení optimální konfigurace pro axiální stupnŤ analytickým zpŤsobem, byly experimentálnŤ pouŤity nastavitelné statory. RŤŤzné nastavení byla na standu testováno, coŤ nakonec dalo uspokojivé výkony, jak je ukázáno v grafu kompresoru na obr 16 [14]. Betele popsal, Ťe blŤhem testu navzdory hladkému blŤhu motoru doŤlo k výskytu nesrovnalostí v tlaku a teplotŤ odelŤených nepšesností testovací skupiny. Tento problém byl vyšŤen, kdyŤ technici objevili poruŤené hliníkové lopatky, které se vyskytovaly ve výstupu vzduchu z kompresoru a konstatovaly, Ťe toto by mohl být ten problém! ZšejmŤ stejné poŤkození lopatek nebylo následkem podstatné nerovnováhy.

10.2 Spalovací komora. Komora byla prstencové konstrukce s proudŤm rozdlŤeným do dvou proudŤ ť do prstencové hlavice a malého proudu vzduchu rozvedeného do ťelní ťásti pro pšřpravu smŤŤi a hošŤní. Nejvíce vzduchu bylo vedeno pšes dvŤ vnitšní a vnŤŤŤ šady prŤŤduchŤ na konci spalovací komory a do komory k dosaŤení potšebné teploty. StŤlna pláŤŤ umístŤlá kolem komory byla chránŤlá proti pšenosu vyzašřovaného tepla prstencovým izolátorem, kolem kterého cirkuloval ťerstvý vzduch z komory. Ťestnáct rozmŤstŤných palivových trysek bylo pouŤito se ťtyšni zapalovacími svŤlkami, dvŤlna na boŤní ose a dvŤ smŤŤující vzhŤru pod ťhlem 45°. Betele naznaŤil, Ťe spalovací komora byla velkou konstrukŤní výzvou a dosáhnout uspokojující radiálního a obvodového teplotního profilu nebylo jednoduché, dávajíc proudový profil vycházející ze smíŤeného proudu kompresorového kola. Tato spalovací komora byla z tohoto dŤŤvodu konstrukŤním kompromisem, ale jedna taková byla nakonec zpracována.

10.3 Turbínová ťást. HeS 011 mŤl skuteŤnŤ pozoruhodnou dvoustupŤovou vzduchem chlazenou turbínu (obr. 17), zkonstruovanou Dr. Maxem Betele. DvŤ šady dutých lopatkových kanálŤ byly chlazeny vzduchem proudících pšes prstenech za posledním kompresorovým stupnŤm. Toto proudŤní chladícího vzduchu bylo vedeno mezi spalovací komorou a hšdelem rotoru, který byl chránŤn kruhovou vložkou. DvoustupŤová axiální turbína byla ochlazována proudŤm vzduchu od kompresoru. Oba disky mŤly duté lopatky se



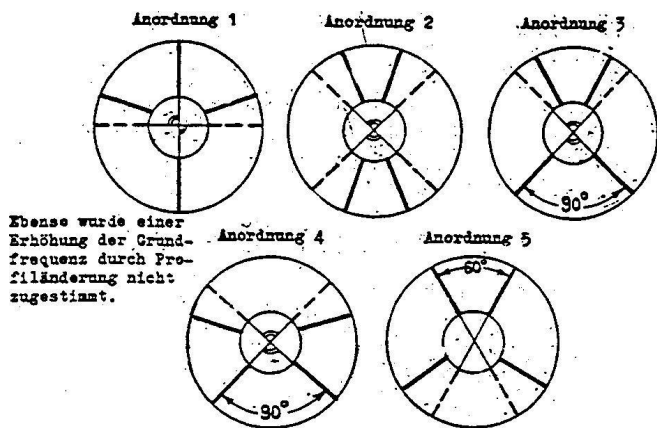
A black and white photograph showing a close-up of a complex, tangled assembly of wires and electronic components, likely part of a spacecraft or military equipment, mounted on a metal frame. The wires are bundled and routed in various directions, connecting different parts of the assembly. Some components appear to be housed in small, rectangular enclosures. The overall impression is one of a highly technical and intricate system.

Figure 10 is a graph showing the variation of total pressure head and adiabatic efficiency with air flow for different speeds (9000, 10,000, 10,500 RPM) at two locations (Location 11 and Location 5). The x-axis is Air Flow (M^3/S) from 18 to 26. The left y-axis is Total Pressure Head ($\times 1000 M$) from 6 to 16. The right y-axis is Adiabatic Efficiency (%) from 75 to 90. Solid lines represent total pressure head, and dashed lines represent adiabatic efficiency. Location 11 is after the 3rd axial stage, and Location 5 is after the mixed-flow wheel.

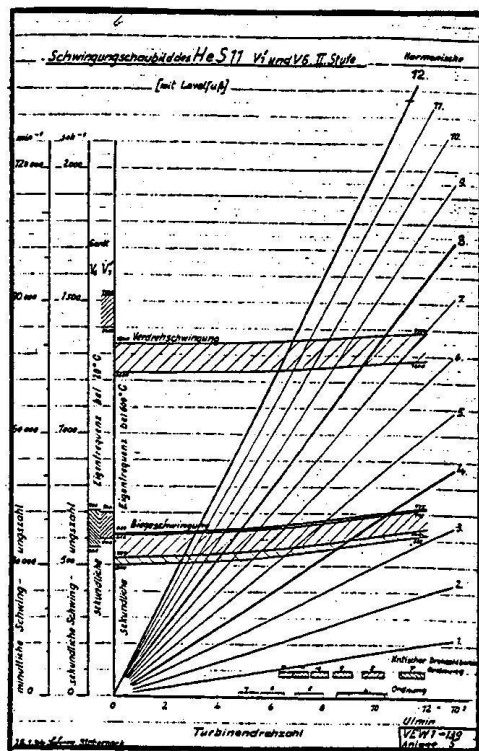
vzduchem, dopravovaným k druhému stupni pŕes díry vyvrtané v prvním stupni. Tok vzduchu vystupoval na ěpi ce lopatek. Vývoj této turbínové řásti byla nejnáro nĕjŕ. Zpořátku byly pouĝity plné lopatky a namáhání zpřisobovalo praskliny na prvním stupni a únavové poruchy na stupni druhém. Resonanĕní poruchy se objevovaly v místĕ řísty podpř zadního uloĝení loĝiska a byly eliminovány nerovnomřným úhlem rozmřřím podpř ke snĕžení buzení sil, ěĝ byly v rezonanci s druhým stupnřm rotoru turbíny. Uspořřádání vzpř je rozebráno na obr. 18. Benteleho diagram²⁶ je zobrazen na obr. 19 [16].

Koneřnou podobu vzduchem chlazených lopatek zkonstruoval Dr. Bentele bez vyuĝití ĝádných strategických materiálř a byly nazývány Ātopfschaufelř. Tyto lopatky byly vyrábřny z výchozího kruhového polotovaru z austenitického chrom-molybdenového ocelového plechu, z kterého byla řaĝena v nřkolika stupních trubice s uzavřřeným koncem s mezioperaĕním tepelným zpracováním. Jak je vidř na obr. 20 [17], mřla střna tlouřřku od 2m u kořene po 0.45 mm u ěpi ky lopatky, tak aby odpovřdal napřřím, existujřím v radiálním teplotním profilu. Nosná plocha profilu byla pak na závř strojnř dokonřena. První a druhý turbínový stupeř pouĝivaly tuto konstrukci a obsahovaly vloĝku pro potřebné rozvedení chladřícího vzduchu a pro řtlum lopatkových vibrací.

²⁶ Bentele vytvořil svůj diagram nezávisle na znalostech Campbellovy práce na vibracích disků parních turbín v USA.



Obr. 18 Některá uspořádání podprůtzu zadního ložiska, zkoumaná při řešení problému vibrací lopatek

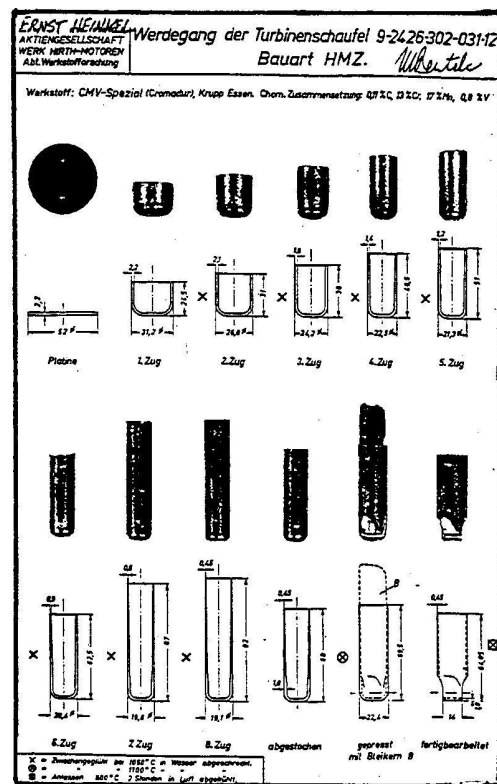


Obr. 19 Bentleyho diagram ukazující budící a vlastní frekvence [16]

10.4 Technické prvky a působení

10.4.1 Ložiska s působením. Na HeS 011 se nacházely dvě hlavní ložiska. Přední hlavní kulíkové ložisko bylo uloženo hned před diagonálním kompresorem a byly zachytávány jak radiální tak tahové síly. Plovoucí hřídel z níž vylínala k pohonu předního axiálního kompresoru a přes kuželový převod poháněla pomocí hřídelu patřící působení. Působení bylo umístěno nad motorem a zahrnovalo startér Riedel²⁷, generátor Siemens nebo Bosch, palivové 1. erpadlo Barmag, vzduchový kompresor Knorr a otákoměr. Zadní ložisko se nacházelo v zadní části dvoustupňové turbíny a bylo chlazeno, jakož i mazáno působkovým olejem.

10.4.2 Palivový systém. Tento systém byl řazen 1. rtícím ventilem, který spolu s regulátorem konstantní rychlosti ovládal palivo a tedy rychlost motoru. Palivo bylo dodáváno nízkotlakým palivovým 1. erpadlem, jež bylo vlastně dvojitém zubovým 1. erpadlem s dvojím nezávislým sáním. Dodávka tohoto 1. erpadla zásobovala vysokotlaké 1. erpadlo typu Barmag, jež



Obr. 20 Dřímýnská metoda výroby vzduchem chlazené lopatky turbíny, začínající kruhovým plechem o prům. 25mm

dodávalo kolem 51,6 l/min při tlaku 40 kg/cm². Tlakový řídící ventil odvedl působitelný průtok zpátky do sací strany nízkotlakého 1. erpadla. Vysokotlaké palivo bylo pak dodáváno do regulátoru a přes dvě prstencová potrubí k 16 vstřikovačům paliva ve spalovací komoře. Tlakový ventil na působních potrubích zajišťoval, aby byl pro zajištění dobré funkce do spalovací komory použit vhodný tlak.

10.4.3 Mazací systém. Mazací olejové nádrže o objemu 12 litrů byly umístěny ve spodní části nosníku působení s 1. erpacím zařízením po obou stranách, jež sestávalo z dodávacího a dvou odsávacích částí. Doplnkové vratné (odsávací) 1. erpadlo bylo umístěno za zadním ložiskem. Rychlost proudění oleje byla 35 l/min při provozním tlaku 3,5-4 kg/cm². Olej stékal gravitací z nádrže do podávacích 1. erpadel a dále proudil přes filtr a sbírač. Jak dvě hlavní ložiska tak ložiska působení byly mazány působkovým sbíračem přes dvě rozváděcí potrubí. Převod a ložiska předku axiálního kompresoru byly odstředivě mazány, když byla kuželová soukolí mazána rozstřikem.

10.4.4 Kuželová Jehla v zadní části. HeS 011 měla v zadní části nastavitelnou kuželovou jehlu, posuvnou pístem uvnitř kužele.²⁸ V původním uspořádání byla jehla spojená s řídícím 1. rtícím ventilem ovládající posuv pístu a odčerpávajícím potrubím tlakového oleje. Toto bylo později změněno na elektricky řazený ventil působního posuvu spojený tak, že když se vypnul, tak se jehla přesunula do pracovní nebo vytažené polohy a když se zapnul, tak se posunula do zatážené pozice pro start.

11. Hans von Ohain, spoluvývojce proudového motoru

Dr. Hans Joachim Past von Ohain se narodil 14. prosince 1911 v německém Dessau. Doktorát z fyziky a aplikované mechaniky získal v roce 1935 na Univerzitě v Göttingenu a zůstal na univerzitě během jeho rozvíjení teorii proudových motorů a

²⁷ Ten používal podobný startér, jako měli Junkersy Jumo 004 a BMW 003.

²⁸ Podobně jako u motoru BMW 003.

postavil demonstrační model. V dubnu 1936 vstoupil do společnosti Heinkel v Rostocku a na podzim 1942 se přesunul do společnosti Heinkel-Hirth do Stuttgartu.

On vedl výzkumný a vývojový program, který vyústil v motor HeS 3B jenž poháněl Heinkel 178, který provedl jako první na světě let s proudovým pohonem dne 27. srpna 1939 na Heinkelově letišti poblíž Rostocku. Také rovněž vyvinul HeS 8A, který byl použit k pohonu světového první dvoumotorové proudové stíhačky He 280, jejíž první let se uskutečnil v dubnu 1941. Poté se za pomoci Dr. Maxe Benteleho účastnil vývoje potencionálního prvního skutečného a sofistikovaného turbojetu na konci druhé světové války, HeS 011.

Byl považován za jednoho z nejlepších konstruktérů v Německu na poli vývoje proudových motorů. Dr. Von Ohain byl pozván do USA v roce 1947, kde se stal výzkumným vědcem v Aero propulsion laboratory, kde přezval zodpovědnost za udržení technické kvality výzkumu a vývoje v oblasti proudových pohonů a paliv.

Úspěchem v této pozici získal národní i mezinárodní uznání. Odešel do penze ze státní služby v roce 1979 a stal se profesorem v oblasti aerodynamiky a na Výzkumném institutu Daytonské univerzity a dále hostujícím profesorem na Univerzitě na Floridě. Byl nesmírně populární mezi svými studenty a vždy měl zájem pomoci mladým lidem s jejich vzděláváním.

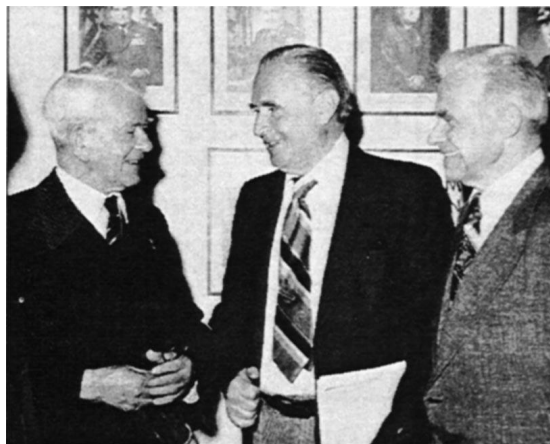
Dr. Hans von Ohain byl mužem pokory a jisté vznešenosti. Po celou dobu svého života a v jeho mnohých přednáškách a písemnostech a písemnostech referoval o polátách existence proudových motorů a vždy si dával záležet na vyjádření uznání přínosu ostatních, oblaž zmírňující jeho přispění.

Během své 32leté služby ve Spojených státech publikoval Dr. Von Ohain více než 30 technických pojednání a registroval 19 U.S. patentů. Přes 50 patentů registroval, když pracoval pro Heinkela. Dr. Von Ohain byl vyznamenán za svůj přínos letectví mnohými cenami, které zahrnovaly zvolení členem Německé akademie let pro letecký výzkum, křížem Cenu Amerického institutu letectví a astronautiku (AIAA) a letné ceny od Air Force. On získal cenu ASME Toma Sawyera v červnu 1990 a byl roku 1990 uveden Národní síní slávy pro letectví. Von Ohain a Sir Frank Whittle byli oceněni Cenou Charlese Drapera v roce 1992 za jejich velkolepý přínos letectví. Tato cena je považována za Nobelovu cenu za techniku. Dále byl vyznamenán třemi letními doktoráty na Univerzitě v Daytonu v Západní Virginii a na Univerzitě Florida. Byl příjemce mnohých prestižních německých cen, včetně Prandtlův prsten za přínos k proudovému letectví. Dr. Von Ohain zemřel ve věku 86 let v Melbourne na Floridě a bude navždy vzpomínán jako spoluvytvořitel proudového motoru a vynálezce světového prvního vzletnuvšího proudového motoru.

Fotografie Dr. Von Ohaina, Sira Franka Whittleho a Dr. Maxe Benteleho [14] je na obr. 21. Toto je poslední známá společná fotografie těchto proudových pionýrů, a jež byla pořízena v roce 1978.

12. Závěr

Tento článek zahrnuje objevitelskou práci Dr. Hanse von Ohaina, konstruktéra proudového motoru a muže, jenž zmínil budoucnost létání a přivedl nás do proudového věku. Jeho průvodní práce pro Heinkela poskytl podnět programu proudových motorů v Německu. Tato stať pokrývá jeho historické motory včetně světového prvního létajícího turbojetu HeS 3B, HeS 8, který poháněl ladnou stíhačku He 280 a světový nejvíce pokročilý proudový motor na konci druhé světové války, HeS 011. Nehledě na jeho pozdní přínosy technologii proudovým motorům až do osmdesátých let, bude vždy vzpomínán a přejímán historií jako průkopník, jež vytvořil podmínky pro proudovou revoluci.



Obr. 21 Fotografie tří průkopníků proudového motoru, pořízená v roce 1978. Zleva doprava: sir Frank Whittle, Dr. Hans von Ohain a Dr. Max Bentele [14].

Poděkování

Jméno vděčí Dr. Maxu Bentelemu za jeho pomoc a komunikaci a za to, že nám poskytl svoje podklady na toto téma. Jeho vynikající autobiografie *Engine revolutions* obsahuje mnoho zajímavých detailů z polítky proudového věku, v kterém on hrál důležitou roli a jež poskytuje cenné údaje. Děkujeme za pomoc také Američan Heritage Center za poskytnutí archivních dat z archivu Dr. Benteleho a dále zaměstnancům archivu Smithsonianova institutu Národního leteckého vesmírného muzea. Vynikající práce pánů Betele, Constanta, Jonese a Gunstona jsou doporučený k podrobnějšímu prozkoumání tohoto tématu.

Odkazy

- [1]. Constant, E. W., II, 1980, *The Origins of the Turbojet Revolution*, Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, MD.
- [2]. Schlaifer, R., 1950, *Development of Aircraft Engines*, Graduate School of Business Administration, Harvard University, Boston, MA.
- [3]. von Ohain, H., 1979, *The Evolution and Future of Aeropropulsion Systems*, *The Jet Age 40 Years of Jet Aviation*, Walter J. Boyne and Donald S. Lopez, eds., Smithsonian Institution, Washington, DC.
- [4]. Scott, P., 1995, *Birth of the Jet Engine*, *Mechanical Engineering*, January, ASME, New York, pp. 66-71.
- [5]. Jones, G., 1989, *The Birth of Jet Powered Flight*, Methuen, London.
- [6]. Meher-Homji, C. B., 1998, *The Development of the Whittle Turbojet*, *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, **120**, No. 2, ASME, New York.
- [7]. Heinkel, E., 1956, *Stormy Life: Memoirs of a Pioneer of the Air Age*, E. P. Dutton and Co., New York.
- [8]. Meher-Homji, C. B., 1997, *The Development of the Junkers Jumo 004B-the World's First Production Turbojet*, *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, **119**, No. 4, ASME, New York.
- [9]. von Ohain, H., 1989, talk made at the 50th Anniversary of Jet Powered Flight, video cassette, Vol. No. 1, AIAA, Dayton Chapter.
- [10]. Bamford, L. P., and Robinson, S. T., 1945, *Turbine Engine Activity at Ernst Heinkel Atiengesellschaft Werk Hirth-Motoren, Stuttgart/Zuffenhausen*, report by the Combined Intelligence Objectives Sub-Committee dated May 1945.
- [11]. Gunston, B., 1995, *The Development of Jet and Turbine Aero Engines*, Patrick Stephens, Ltd., UK.
- [12]. Carter, J. L., 1945, *Ernst Heinkel Jet Engines*, Aeronautical Engine Laboratory -AELI, Naval Air Experimental Station, Bureau of Aeronautics, US Navy, June, 1945.
- [13]. *An Encounter Between the Jet Engine Inventors Sir Frank Whittle and Dr. Hans von Ohain*, 1978, Wright-Patterson Air Force Base, OH, History Office, Aeronautical Systems Division, US Air Force Systems Command.
- [14]. Bentele, M., 1991, *Engine Revolutions: The Autobiography of Max Bentele*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
- [15]. Neville, L. E., and Silsbee, N. F., 1948, *Jet Propulsion Progress*, McGraw Hill Inc, New York.
- [16]. Hirth Motoren G.m.b.H. Report, 1944, VEW 1-139, *Schwingungsuntersuchungen an der He S 11-Turbine V1 und V6 mit Vollschaufeln*, dated Jan 31, 1944; Max Bentele Papers, American Heritage Center, University of Wyoming, Laramie, WY.
- [17]. Hirth Motoren G.m.b.H. Report, 1944, VEW 1-140, *Untersuchung der Fussbefestigung von Topf- und Falt-schaukeln durch Kaltschleuderprüfung*, dated April 16, 1944; Max Bentele Papers, American Heritage Center, University of Wyoming, Laramie, WY.