

Entwurfs- und Baugrundlagen von Reihenflugmotoren

Von Dipl.-Ing. Oskar KURTZ, Augsburg

Die wesentlichen beim Entwurf von Reihenflugmotoren auftretenden Fragen der Gestaltung, namentlich der Zylinderanordnung und des konstruktiven Aufbaus werden behandelt. Außerdem wird der Einfluß der Konstruktion auf das Baugewicht, das Betriebsverhalten und die Fertigung erörtert. An Hand einiger Ausführungsbeispiele wird die konstruktive Lösung bei einigen wichtigen Bauarten besprochen.

I. Die Aufgabenstellung beim Entwurf.

II. Gesichtspunkte für die äußere Gestaltung

- 1. Geforderte Leistung und Zylinderzahl**
- 2. Die Hauptabmessungen verschiedener Zylinderanordnungen und ihr Einfluß auf den Einbau**

III. Gesichtspunkte für die Durcharbeitung der Konstruktion

- 1. Einfluß der Konstruktion auf das Baugewicht**
- 2. Einfluß der Konstruktion auf Betriebsverhalten und Fertigung**
- 3. Kinematische und dynamische Verhältnisse im Kurbeltriebwerk und Massenausgleich**
- 4. Kühlstoff- und Schmierstoffführung**
- 5. Steuerungs- und Geräteantrieb**

IV. Gesichtspunkte für den Einbau und die Triebwerkverkleidung

V. Konstruktive Lösungen bei den heute üblichen Bauformen

- 1. 12 Zylinder-Reihenmotoren**
- 2. 24 Zylinder-Reihenmotoren**

Zusammenfassung

9842

521

Entwurfs- und Baugrundlagen von Reihenflugmotoren

I. Die Aufgabenstellung beim Entwurf

Die Geschichte des Flugmotorenbaus lehrt, daß von den vielen ausgeführten Konstruktionen sich nur wenige infolge ihrer technischen Überlegenheit längere Zeit erfolgreich behaupten. Bei Reihenflugmotoren größerer Leistung, die im folgenden betrachtet werden, ist hierfür nicht nur die Zylinderzahl und -anordnung, sondern auch die Ausführung der Kurbelgehäuse und Zylinder ausschlaggebend. Bei letzteren ist die Herstellungsmöglichkeit (z. B. Ausschußziffer) und das Betriebsverhalten (z. B. Festigkeit, Wärmedehnungen) von entscheidender Bedeutung; für diese Bauteile wurden auf Grund langer Betriebserfahrungen Bestlösungen gefunden. Durch sinnmäßige Verwertung gewonnener Erkenntnisse lassen sich Entwicklungszeiten und -kosten verringern, auch wenn die für eine bestimmte Bauart gegebene Leistungsgrenze zum Aufsuchen neuer Wege zwingt.

Bei jedem Neuentwurf ist die erste Forderung, mit geringstem Gewicht und kleinsten äußeren Abmessungen die größtmögliche Leistung in der verlangten Arbeitshöhe unter Umständen bei sparsamstem Kraftstoffverbrauch herauszuholen. Dem Triebwerkgestalter kann vom Flugzeugbauer auch bei hohen Leistungsanforderungen nur ein beschränkter Platz zugestanden werden. Ein ideales Triebwerk soll heute ganz im Rumpf oder im Tragflügel verschwinden, bzw. die Außenabmessungen des Motors sollen die Nebenverkleidung der Luftschraube nicht überschreiten (1)*. Da jedoch immer stärkere Triebwerke gebraucht werden, läßt sich diese Forderung noch nicht erfüllen, weil durch die Zunahme der Fluggeschwindigkeiten und Flächenbelastungen, jedenfalls bei den am meisten verwendeten zweimotorigen Flugzeugen, die Flügelabmessungen recht klein geworden sind.

Eine andere wichtige Aufgabe ist die Unterteilung großer Triebwerke in zwei oder mehrere gekuppelte, aber voneinander unabhängige Einzelmotoren, damit bei einer Störung nicht die ganze Leistung der Triebwerkeinheit ausfällt (Doppelmotoren) [2, 11]. Untersetzungsgetriebe mit zwei oder mehreren Gängen [3] und für verschiedene Drehrichtungen der Luftschraube sowie gegenläufige Propeller sind Aufgaben, mit denen sich der Motorenkonstrukteur in der nächsten Zeit auseinandersetzen muß. Großmotoren von 2000 bis 3000 PS sind in Entwicklung, 4000 bis 5000 PS werden in Zukunft angestrebt. Da Triebwerke von 2000 bis 3000 PS 24 Zylinder, größere Leistungen noch mehr erfordern, müssen gute Lösungen für den Aufbau solcher vielzylindriger Motoren gefunden werden.

*) Siehe Schrifttum.

Außerdem ist zu prüfen, ob sich die Hauptabmessungen solcher Motoren mehr in die Länge oder in die Breite und Höhe erstrecken sollen. Herstellungsfragen und -kosten sowie die Wartungsmöglichkeit und Betriebsbereitschaft werden jedoch der Zylinderzahl nach oben hin eine Grenze setzen; denn es ist zu fordern, daß z. B. Kerzen und Düsen leicht zugänglich sind, und daß die wichtigsten Teilüberholungsarbeiten, wie Nachschleifen der Ventile, Ausbau von Kolben, Auswechseln von Kolbenringen usw. auch bei eingebautem Triebwerk vorgenommen werden können.

Die erwähnten Punkte sollten darauf hinweisen, in welcher Richtung die gedanklichen Vorarbeiten bei einem Entwurf gehen sollen; genaue Richtlinien werden sich jedoch nie geben lassen, da immer der Einzelfall und der Verwendungszweck eines Motors (z. B. für Hochleistungs- oder Langstreckenbetrieb) entscheiden wird, welche Forderungen in erster Linie zu erfüllen sind. Da im Rahmen dieses Beitrages nur die Entwurfs- und Baugrundlagen von der konstruktiven Seite aus erörtert werden, sollen Schwingungen, thermodynamische Fragen, Höhenverhalten und Ladersauführung, Regelung und Kraftstoffverbrauch nur soweit nötig berührt werden.

II. Gesichtspunkte für die äußere Gestaltung

1. Geforderte Leistung und Zylinderzahl

Die Frage, ob für eine gegebene Leistung viele kleine oder weniger große Zylinder günstiger sind, ist von Bensing er, Denkmeier, Rieckert und Held untersucht worden [4, 5]. Bensing er und Denkmeier weisen allgemein nach, daß kleine Zylinderabmessungen für das Baugewicht und die Raumeistung vorteilhaft, daß Kleinstwerte des Leistungsgewichts bei Zylindern von etwa 0,75 bis 1,5 l zu erwarten sind, und daß mit zunehmender Zylinderzahl die geeigneten Zylinderabmessungen kleiner werden. Rieckert und Held kommen zu ähnlichen Ergebnissen und heben die niedrigeren Kolbentemperaturen, die kleinere Stirnfläche und die verringerte Klopfneigung kleinerer Zylinder hervor.

Wenn sich die Praxis nicht entschlossen hat, in weiterem Umfang von diesen Erkenntnissen Gebrauch zu machen, so mögen dafür folgende Gründe mitsprechen:

a) Die Schwierigkeiten, eine auf eine bestimmte Zylindergröße eingerichtete Reihenfertigung umzustellen und die Wirtschaftlichkeit der Herstellung. Aus letzterem Grunde rät Fedden von einer zu großen Vermehrung der Zylinderzahl ab [6]; Mead hält einen Zylinder von 2,15 l (140 mm Bohrung, 140 mm Hub) mit 100 PS Zylinderleistung bei 47 PS/l für den besten Kom-

Zahlentafel 1

Bau- und Betriebswerte einiger neuerzeitlicher flüssigkeitsgekühlter Reihenmotoren

Muster	Bohrung mm	Hub mm	Hub- ver- hältnis	Hub- raum je Zylinder l	Gesamt- hub- raum l	Hub- raum- lei- stung PS/l	Zy- linder- lei- stung PS	Abflug- lei- stung PS	Abflug- Dreh- zahl min ⁻¹	Mittl. Kolben- geschw. m/s	Mittl. Nets- druck kg/cm ²	Gesamt- gewicht kg	Hub- raum- gewicht kg/l	Lei- stungs- gewicht kg/PS	Gleich- druck- höhe m
Jumo 211	150	165	1,12	2,92	35	34,9	102	1220	2300	12,85	13,65	585	16,8	0,48	6000
D B 601	150	160	1,06	2,82	33,9	34,6	97,5	1175	2400	12,8	12,95	575	18,9	0,558	6000
Rolls Royce Merlin 10	137,2	152,4	1,1	2,25	27,0	40,6	168,5	(2040)	3000	15,2	(22,8)	633	23,5	0,593	5410
Allison V 1710 C 6	139,6	152,2	1,09	2,33	28,0	35,4	82,5	1000	2600	13,2	12,44	580	20,7	0,548	3650
Hispano Buiza 12 Y	150	170	1,13	3,0	36	33,6	100	1200	2800	14,7	11,74	490	13,6	0,408	3500
Napier Dagger . .	96,8	95,3	0,985	0,70	16,84	57,5	40,02	970	4500	14,25	11,5	577	34,2	0,595	2700
Jumo 207	105	2x160	1,33	2x1,38	16,7	60,4	167	1000	3000	14,5	9,14	649	39,1	0,636	6100

promiß zwischen Hubraumausnutzung und Herstellungskosten [7].

b) Die Leistungssteigerung der 12 Zylinder-Reihen-, der 9- und 14 Zylinder-Sternmotoren mit Zylindern von 2,3 bis 3,3 l Hubraum und Zylinderleistungen von mehr als 100 PS.

Aus Zahlentafel 1 sind die wichtigsten Bau- und Betriebswerte erfolgreicher Reihenmotoren nach dem heute bekannten Stand der Entwicklung ersichtlich. Bei einer Entwurfsaufgabe wird meist vom Auftraggeber eine bestimmte Leistung verlangt und hierfür das Baugewicht und der größte zulässige Motorquerschnitt vorgeschrieben, weil das Triebwerk zu vorhandenen oder in der Entwicklung stehenden Zellen passen muß. Da die Außenabmessungen neben dem Leistungsgewicht von entscheidender Bedeutung für die Einsatzfähigkeit eines Motors sind, ist meist der anwendbare Hub nach oben hin begrenzt, soweit nicht die Rücksicht auf die größte zulässige Kolbengeschwindigkeit, die heute etwa 15 m/s beträgt, ohnehin einen kleineren Hub vorschreibt; denn im Flugmotorenbau wird allenthalben eine höhere mechanische Schnellläufigkeit angestrebt. Zahlentafel 1 zeigt, daß der Hub bei keinem neuzeitlichen Reihenmotor 170 mm überschreitet; bei den meisten Baumustern haben die Konstrukteure Hübe unter 160 mm vorgezogen. Sind Bohrung und Hubverhältnis gewählt, dann liegt mit der Zylinderleistung die für den Motor erforderliche Zylinderzahl fest. Nach Zahlentafel 1 können z. Z. durchschnittliche Zylinderleistungen von 100 bis 130 PS eingesetzt und mit einer Steigerung für den Abflug auf 150 bis 170 PS bei Kraftstoff O. Z. 100 gerechnet werden.

Grundsätzliche Möglichkeiten des Zylinderaufbaus, ausgehend von der einfachen Zylinderreihe, sind von Jaklitsch angegeben [15] (Zahlentafel 2).

Nach großen Gesichtspunkten können Reihenflugmotoren nach etwa folgenden Leistungsklassen im Hinblick auf die Entwicklungsmöglichkeiten eingeteilt werden:

1. 1200 bis 1800 PS 12 Zylinder von 28 bis 42 l Hubraum.
2. 1800 bis 2700 PS 18 Zylinder von 42 bis 63 l Hubraum.
3. 2400 bis 3600 PS 24 Zylinder von 56 bis 84 l Hubraum.

Die Bedeutung der 18 Zylinder-W-Motoren ist allerdings in den Hintergrund getreten. 24 Zylinder-Motoren sind z. Z. nur als X- oder Doppel-V-Triebwerke mit zwei 12 Zylinder-Motoren nebeneinander erfolgreich eingeführt, und nur einmal wurde ein Aggregat mit zwei 12 Zylinder-Motoren hintereinander für Rennzwecke (Fiat As 6) gebaut. Daraus kann man schließen, daß die Entwicklung der 24 Zylinder-Motoren in einer Einheit und mit einer Kurbelwelle, z. B. als 24 Zylinder-X-Motoren noch nicht bis zur Serienreife fortgeschritten ist, obwohl diese Bauart bisher als das Entwicklungsziel beim Reihentriebwerk angesehen und die Anordnung eines geteilten Hauptpleuels mit drei angelenkten Nebenpleueln beim Reihenmotor für konstruktiv ausführbar gehalten wurde [8, 2]. Der Bau noch stärkerer Triebwerke, z. B. von 4000 bis 5000 PS mit größeren Zylinderzahlen als Reihensternmotoren, wird besonders sorgfältige Untersuchungen über Zündfolge, Pleuelstangen-ausführung, Lagerbelastung, Massenausgleich und Kurbelgehäuseaufbau erfordern. Konstruktive Studien zeigen, daß schon bei einem 24 Zylinder-H- und X-Motor das Kurbeltriebwerk für die Wartung schwer zugänglich wird, wenn auch der Zusammenbau selbst nicht viel schwieriger sein dürfte als bei einem 12 Zylinder-V-Motor. Bei diesem lassen sich Lager und Kolben auch bei eingebautem Triebwerk verhältnismäßig leicht überwachen und nacharbeiten, da nach Entfernung des Kurbelgehäusedeckels der Kurbitrieb zugänglich ist und nach Abnahme eines Zylinderblockes oder -kopfes die betreffenden Pleuel samt Kolben herausgenommen werden können. An einem H- oder X-Motor sind zwar bei Verwendung abnehmbarer Zylinderblöcke, z. B. der Bauart Hispano-Suiza, die Kolben zugänglich, aber zu

Zahlentafel 2
Grundsätzliche Möglichkeiten der Zylinderanordnung
(nach Jaklitsch)

		Fächerung	Reihung	Bündelung
A	Einfach-Zylinder	Fächermotoren Sternmotoren	Reihenmotoren	Trommelmotoren
B	Dopplung	Doppelfächermotoren Doppelsternmotoren	Doppelreihenmotoren Boxermotoren H-Motoren V-Motoren	Zwillings-trommelmotoren
C	Kopplung	V-Motoren W-Motoren X-Motoren Reihensternmotoren	Kastenmotoren	

einer Nacharbeit an einem Pleuel- oder Grundlager muß wegen des in der Mitte geteilten Kurbelgehäuses der ganze Motor aus der Zelle ausgebaut werden.

Welche konstruktiven Wege stehen nun für größere Leistungen, d. h. über 3600 PS offen? Die Vermehrung der Zylinder, die auf eine Kröpfung wirken, auf 5 bis 7 unter Beibehaltung der Sechszylinderreihe führt zu Reihensternmotoren von 30 bis 42 Zylindern. Erfahrungen über solche Großtriebwerke, die heute erst in Planung oder Entwicklung sind, stehen noch nicht zur Verfügung. Hierbei werden aber neben den bereits angeschnittenen Fragen des Kurbeltriebs die Möglichkeiten der Kühlung — ob mit Luft oder Flüssigkeit — zu untersuchen sein, und es werden für die Kurbelgehäuse vom bisherigen abweichende konstruktive Lösungen, z. B. Ausführungen in Stahl, gefunden werden müssen. Eine andere Möglichkeit, nämlich die Anwendung der Achtzylinderreihe, vergrößert die Baulänge und erfordert die Klärung neuer konstruktiver und gußtechnischer Fragen. Ob die große Baulänge von Flugmotoren mit Achtzylinderreihen vom Zellenbau ertragen werden kann, wäre durch Einbauuntersuchungen festzustellen. Nach heutiger Auffassung scheint aber — unter Zugrundelegung der Zylinderabmessungen von 12 Zylinder-Motoren — eine so große Baulänge kaum tragbar oder in ihrem Anwendungsgebiet zumindest beschränkt zu sein. Die Verwendung einer achtfach gekröpften Kurbelwelle ist zwar schwingungstechnisch möglich [9], aber der Konstrukteur müßte die Beanspruchungen und beträchtlichen Wärmedehnungen so langer Leichtmetallgußstücke beherrschen lernen und die Gießerei Wege zur Herstellung des langen und dünnwandigen Gehäuses (Ausschußziffer!) und des Zylinderblockes bzw. -kopfes finden, sofern bei letzteren eine Teilung nicht möglich ist. Falls solche Gußstücke nicht herzustellen sind oder

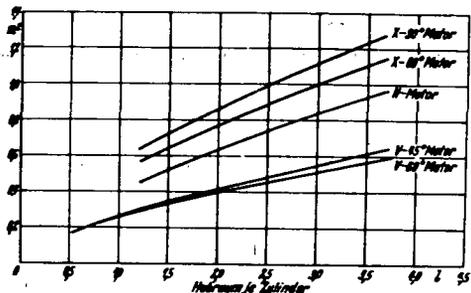
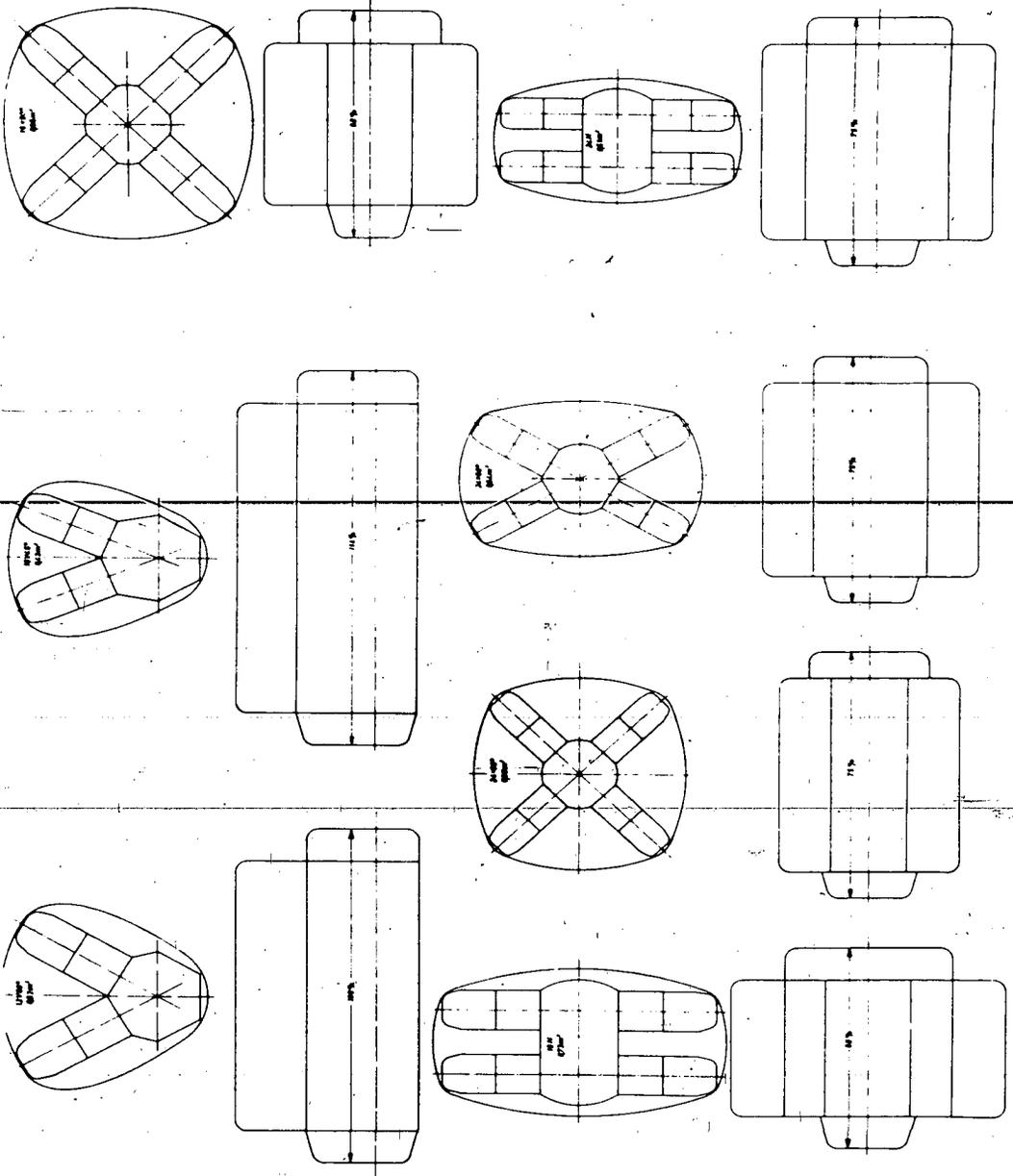


Abb. 1 Stirnquerschnittverkleideter Flugmotoren in der Ebene des vordersten Zylinders (nach Studien der DVL)



wegen des Ausschusses zu teuer werden, dann können hier nur neue konstruktive Lösungen, z. B. die bei den Marine-Hochleistungsdieselmotoren der MAN bewährte Stahlbauweise, Erfolg bringen. Mit der Achtzylinderreihe sind dann 16 Zylinder-V. und 32 Zylinder-Doppel-V.-Motoren sowie 32 Zylinder-H- und X-Motoren grundsätzlich ausführbar.

Als Mittel zur Verwirklichung eines Vielzylinder-motors verdient ferner der Vorschlag von Junkers für

einen Vierwellen-Großdieselflugmotor der Erwähnung [10]. Bei diesem arbeiten die Antriebsritzeln der vier Kurbelwellen auf ein zentrales mit der Luftschraubenwelle verbundenes Zahnrad, eine Anordnung, die allerdings nur für Zweitakt-Gegenkolbenmotoren geeignet ist. Ein solches Triebwerk wäre als 48 Zylinder-Motor mit sechsfach und als 64 Zylinder-Motor mit achtfach gekröpfter Welle denkbar. Der Aufwand von vier Kurbelwellen dürfte sich durch die Verwendung gleicher

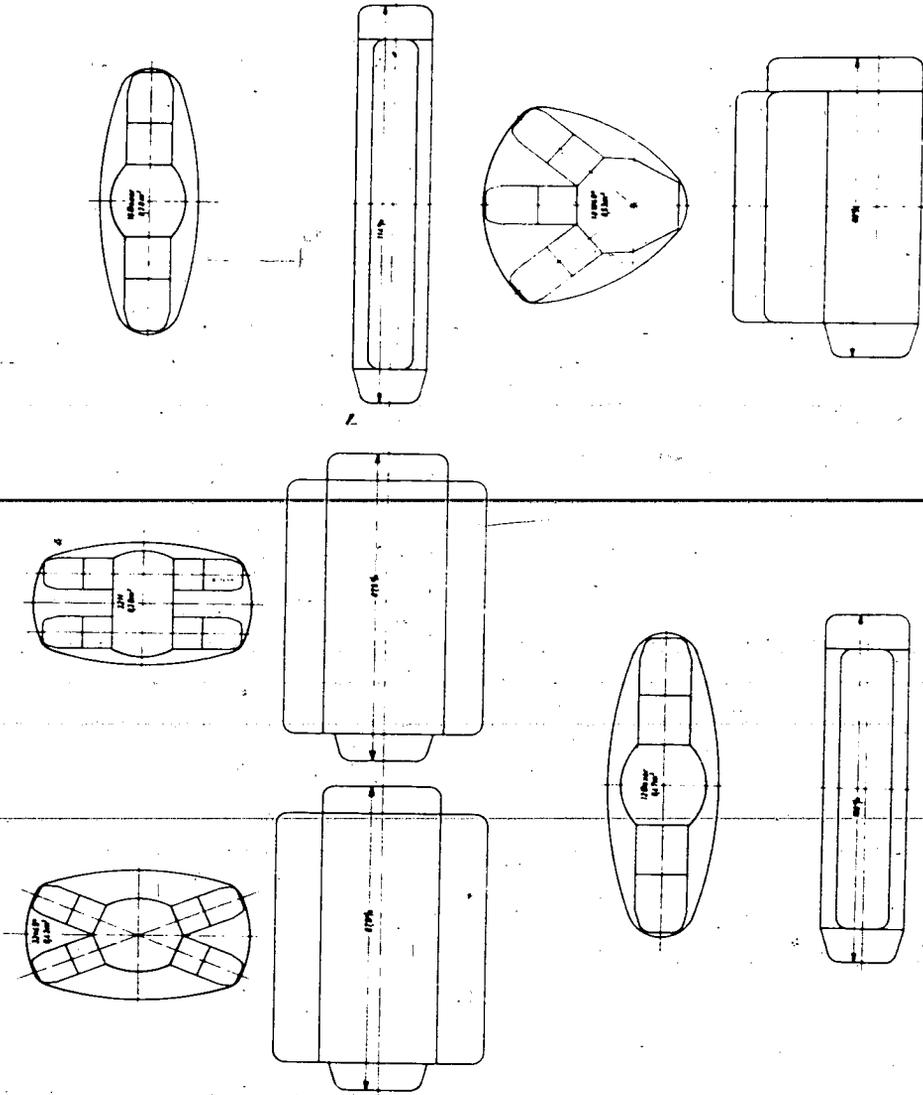


Abb. 2. Stirnflächen und Baulängen flüssigkeitsgekühlter Reihenmotoren von $N = 1200 \text{ PS}$ ($V_K = 13 \text{ m/s}$, $\lambda = D = 1,0$; Ladedruck $p = 1,3 \text{ ata}$ in 4 km Höhe)

und einfacher Teile im Kurbeltrieb rechtfertigen; die schwingungstechnischen Probleme und die Fragen der Wartbarkeit und Zugänglichkeit bedürfen jedoch besonderer Untersuchung.

Bei Großtriebwerken für Langstreckenbetrieb wird die Unterteilung in zwei oder mehrere miteinander lösbar gekuppelte, unabhängige Motoren betriebliche Vorteile bringen und die Sicherheit im Flug erhöhen [11]. Ob die Aufteilung in zwei Motoren wie beim Doppel-V-Motor genügen wird, oder ob eine noch weitergehende Gliederung in drei oder vier Motoren erforderlich ist, müßte die Zukunft lehren.

In diesem Zusammenhang sei noch auf die Erfahrung hingewiesen, bei Auslegung neuer Motoren am Hubraum nicht zu sehr zu sparen; denn meistens werden während der Entwicklungs- und Erprobungszeit die Leistungsforderungen erhöht, so daß eine Reserve nützlich ist. Schließlich ist es vorteilhaft, die Zylinderabstände im Gehäuse und im Zylinderblock so zu wählen, daß die Bohrung im Bedarfsfall um einige Millimeter vergrößert werden kann; am Hub läßt sich nachträglich meist nichts mehr ändern, da man im allgemeinen, die Abstände der Gehäusewände von den umlaufenden Teilen des Kurbeltriebs nicht größer als unbedingt nötig halten wird.

Zahlentafel 3 Kennzahlen für Flugmotoren von 1200 PS Leistung bei $V_k = 13$ m/s Kolbengeschwindigkeit ($a/D = 1,0$) und Ladedruck $p = 1,3$ ata Überladung in 4 km Höhe

Zylinderzahl	9	12	14	16	18	24	32
Leistung je Zylinder	133,3	100	86	75	67	50	37,5
Zylindergröße	4,9	3,12	2,48	2,03	1,7	1,12	0,74
Hub und Bohrungen	184	168	147	137	129	113	98
Drehzahl	2120	2470	2660	2840	3020	3450	3980
Querschnitt der Motorgondel in der Ebene der vordersten Zylinder	—	—	—	—	—	—	—
V-Bauart	—	0,53	—	0,43	—	—	—
W-Bauart	—	—	—	—	0,53	—	—
X-Bauart	—	—	—	0,86	—	90° : 0,6	0,43
H-Bauart	—	—	—	0,73	—	60° : 0,54	—
Boxer	—	0,47	—	0,38	—	0,51	0,38
Durchmesser bei Sternmotoren	1,610	—	1,190	—	1,130	—	—
Gewicht	—	—	—	—	—	—	—
V-Bauart	—	660	—	620	—	—	—
X-Bauart	—	—	—	710	—	640	605
H-Bauart	—	—	—	620	—	640	605
Boxer	—	—	—	—	—	—	—
Sternmotor	710	—	640	—	615	—	—

2. Die Hauptabmessungen verschiedener Zylinderanordnungen und ihr Einfluß auf den Einbau

a) Allgemeine Anforderungen

Aus den meisten Veröffentlichungen der letzten Zeit geht hervor, daß die Verkleinerung der Motorstirnflächen eine allererste Forderung des Flugzeugbaus ist und daß darum der Motorenkonstrukteur alle Möglichkeiten ausnutzen muß, größte Leistungen mit kleinsten Abmessungen zu erzielen. Die Baulänge ist dabei nicht von so entscheidender Bedeutung wie der Querschnitt, doch darf sie nicht außer acht gelassen und nicht zu groß werden. Bei dieser vorgezeichneten Entwicklungsrichtung ist nun zu klären, wie groß der Querschnitt des verkleideten Motors für eine bestimmte Leistung werden kann, und welche Bauformen unter diesen Gesichtspunkten brauchbare Lösungen geben. Zu einer vergleichenden Bewertung der Bauarten kann die Stirnflächenleistung (PS/m² Gondelquerschnitt), die von Vohrer für verschiedene Flugmotoren bestimmt wurde [12], verwendet werden.

Auch die DVL hat die Stirnquerschnitte verkleideter Motoren von verschiedenen Bauformen ermittelt Abb. 1 [13]. Um jedoch die Aussichten von Neuentwürfen namentlich für Triebwerke höherer Leistung sicherer beurteilen zu können, sollen im folgenden die Hauptabmessungen von Reihenmotoren mit verschiedenen Zylinderanordnungen für zwei Leistungsklassen betrachtet werden.

b) Reihenmotoren von 1200 bis 1500 PS Abflugleistung

Aus Abb. 2 sind die konstruktiv ermittelten Motorquerschnitte und Baulängen, aus Zahlentafel 3 die errechneten Kennzahlen ersichtlich, die sich für verschiedene mögliche Bauformen und Zylinderzahlen von 9 bis 32 bei Ausrüstung mit einem Lader für 4 km Nennleistungshöhe ohne den Gewichtsbedarf für die Kühlung ergeben (nach einer früheren Untersuchung des Verfassers entsprechend ergänzt [8]). Zahlentafel 3 enthält zum Vergleich auch die entsprechenden Kennzahlen für 9, 14 und 18 Zylinder-Sternmotoren, bei denen jedoch der Gewichtsbedarf für die Kühlung einbegriffen ist.

c) Günstige Bauformen

- 32 Zylinder-H- und X-Motor,
- 24 Zylinder-H- und X-Motor,
- 16 Zylinder-V- und Boxermotor,
- 12 Zylinder-V- und Boxermotor.

Zu a) und b). Die Erwähnung der 32- und 24 Zylinder-Motoren in dieser Leistungsklasse dient nur dem Vergleich, da sich der Aufwand so vieler Zylinder trotz der kleinen Stirnflächen und Leistungsgewichte wegen der Herstellungskosten nicht rechtfertigt. Der einzige hierher passende bekannte 24 Zylinder-H-Motor Napier-Dagger stellt keine konstruktiv glückliche Lösung dar, da er trotz hoher Stirnflächenleistung ein zu großes Leistungsgewicht aufweist.

Zu 7) Die im Querschnitt gleichen und nur wenig schwereren 16 Zylinder-V- und Boxermotoren (ersterer mit 45° Gabelwinkel) bilden hier offenbar die beste Lösung, da der Bauaufwand tragbar ist und die Einbauverhältnisse gut werden. Der 16 Zylinder-V-Motor ist wiederholt zur Ausführung vorgeschlagen worden [11]. Hertel gibt die Verkleinerung der Stirnfläche gegenüber dem 12 Zylinder-Motor mit $\frac{F_{16}}{F_{12}} = 0,729$ an, ein Wert, der nach Abb. 2 nicht ganz erreicht wird und nur 0,81 beträgt. Daß die Bauart noch nicht ausgeführt wurde, mag an den schon erwähnten Herstellungs- und Betriebsfragen liegen. Die Ansichten ganz im Tragflügel verstrahlender Boxermotoren sind gleichfalls untersucht worden [14]. Gegen ihre Anwendung bei zweimotorigen Flugzeugen spricht, daß die Flügelabmessungen zu klein sind und der zum Einbau erforderliche Platz nicht frei gemacht werden kann (z. B. wegen des Einzichfahrwerks). Für ganz große Flugzeuge dürften diese Gründe nicht ausschlaggebend sein; es steht daher noch nicht fest, ob die Frage des Boxermotors endgültig erledigt ist.

Zu 8) Der 12 Zylinder-V-Motor wird wegen seines bekannten und einfachen Aufbaus nach wie vor die meist verwendete Bauart in dieser Leistungsklasse sein, obwohl die Stirnfläche 0,53 m² nicht als sehr günstig zu bezeichnen ist. Für die etwas schlechtere Ausführung als Boxermotor gilt sinngemäß das unter 7) Gesagte.

d) Ungünstige Bauformen

- 16 Zylinder-H- und X-Motor,
- 18 Zylinder-W-Motor.

Querschnitte und Gewichte werden so ungünstig, daß diese Bauformen ausscheiden.

e) Reihenmotoren von 1800 bis 2700 PS Abflugleistung

Mit Zylinderzahlen von 16 bis 32 und Zylinderinhalten von 3,0 bzw. 2,5 l lassen sich die in Abb. 3 zusammengestellten Bauformen ausführen:

- a) 16 Zylinder-V-Motor,
- β) 18 Zylinder-W-Motor,
- γ) 24 Zylinder-W-Motor,
- δ) 24 Zylinder-H- und X-Motor,
- ε) 24 Zylinder-Doppel-V-Motor,
- ζ) 24 Zylinder-Tandemmotor,
- η) 32 Zylinder-H- und X-Motor,
- θ) 32 Zylinder-Doppel-V-Motor,
- ι) Vierwellen-Gegenkolbenmotor.

Zu a) Der 16 Zylinder-V-Motor ist auch in dieser Leistungsklasse mit 0,49 m² Stirnfläche noch eine günstige Lösung für etwa 1800 PS, sofern die Baulänge in Kauf genommen werden kann.

Zu β) Etwas größer im Querschnitt, aber für eine Leistung von 2000 PS brauchbar, wird der 18 Zylinder-W-Motor, der heute nur noch von Isotta-Fraaschini hergestellt wird [21]. Der kleinste mögliche Gabelwinkel beträgt 40°, so daß die beiden äußeren Zylinderreihen einen Winkel von 80° einschließen. Die Pleuelkonstruktion, Mittelpleuel mit zwei angelenkten äußeren Nebenpleueln, bedingt eine Vergrößerung der Bauhöhe und damit des Querschnitts.

Zu γ) Ähnlich ist der 24 Zylinder-W-Motor zu beurteilen, der Leistungen bis 2700 PS ermöglichen würde. Ob die Baulänge tragbar ist, muß der Einzelfall entscheiden; Betriebserfahrungen liegen nicht vor.

Zu δ) Nach Schriftumsangaben müßten 24 Zylinder-H- und X-Motoren mit Stirnflächen von 0,84 m² und 1,05 m² die besten Aussichten für Leistungen bis 2700 PS haben. Nach einem konstruktiven Vergleich beider Bauarten — X-Motor mit 60° Gabelwinkel — von Kappus sind dem zwar etwas schwereren, aber im Querschnitt wesentlich kleineren H-Motor, was auch Mead feststellt, bessere Aussichten zuzusprechen [7, 9]. Diese Ergebnisse sind sinngemäß für den X-Motor mit 90° Gabelwinkel übertragbar. Während nun ein H-Motor von 2600 PS in übersichtlicher Konstruktion von Hispano-Suiza ausgeführt worden ist, sind praktische Erfahrungen mit X-Motoren noch nicht bekannt, wenn man von veralteten Mustern absieht. Sofern nicht andere Gründe gegen diese Bauform sprechen, dürfte der X-Motor mit 90° Gabelwinkel trotz des etwas größeren Querschnitts einem solchen mit 60° vorzuziehen sein. Das an den Ecken abgerundete Quadrat ist für den Einbau im Rumpf und im Flügel gleich gut geeignet; die Zubehörteile, wie Vergaser, Einspritzpumpen, Zündkerzen und Düsen, werden bei dem großen Gabelwinkel leicht zugänglich.

Zu ε) Doppelmotoren sind neben einer luftgekühlten Ausführung für kleinere Leistung (Menasco Unitwin) neuerdings in zwei Baumustern in Fertigung (DB 606 und Allison). Obwohl mit einem Querschnitt von 0,97 m² schlechter als andere 24 Zylinder-Bauformen, gewinnen sie wegen ihrer größeren Betriebssicherheit an Boden. Gegenüber diesem bedeutenden Vorteil scheint der Nachteil des größeren Stirnwiderstandes zurückzutreten.

Zu ζ) Ein 24 Zylinder-Motor in Tandemanordnung ist bisher nur einmal ausgeführt worden (Fiat-Rennmotor A 6). Der geringen Stirnfläche des 12 Zylinder-V-Motors steht als Nachteil die große Baulänge gegenüber, die die Anwendungsmöglichkeit solcher Triebwerke stark einschränken wird.

Zu η) und θ) Diese Motoren werden im Stirnquerschnitt klein und erhalten ein günstiges Leistungsgewicht. Ob sich die Zylinderzahl und die vergrößerte Baulänge vertreten läßt, muß der Einzelfall entscheiden.

Zu ι) Der bereits erwähnte Vierwellen-Motor nach Vorschlag von Junkers erreicht mit 0,786 m² eine kleine Stirnfläche und gibt voraussichtlich gute Unterbringungsmöglichkeit für Geräte und Zubehörteile in dem von den Zylindern gebildeten Hohlraum.

Vorstehende Betrachtungen mußten sich dem Stand der Technik entsprechend auf die dem Konstrukteur geläufigen Bauformen beschränken und konnten das ganze Gebiet natürlich nicht erschöpfend behandeln. Wie das Beispiel der Doppel-V-Motoren zeigt, kann die Forderung geringster Stirnfläche unter besonderen Verhältnissen, z. B. für den Langstreckenmotor, zugunsten der höheren Betriebssicherheit im Flug zurücktreten. Die Möglichkeit des Reihenbaus von Motoren verschiedener Leistungsklassen mit gleichen Bauteilen und Baugruppen, die Wartungsmöglichkeit und nicht zuletzt die Herstellungskosten werden auch oft entscheidend mitprechen.

Eine kurze Zeit ist vergangen, seitdem es gelungen ist, Leistungen von mehr als 2000 PS mit normaler Betriebssicherheit in einer Triebwerkeinheit herzustellen. Diese Motoren sind jedoch erst in so geringen Stückzahlen eingesetzt, daß nur wenig Erfahrungen verfügbar sind, aus denen der Konstrukteur lernen kann. Für Großtriebwerke von 3000 PS und darüber ist nur die Lösung möglich, die Zylinderzahl weiter zu vermehren und mit dem Reihensternmotor eine Bauart zu schaffen, bei der sich die Weiterentwicklung des flüssigkeitsgekühlten Reihenmotors mit der des luftgekühlten Sternmotors berühren wird.

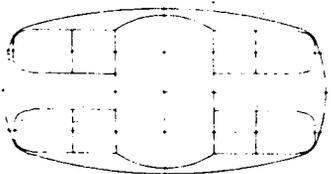
f) Zylinderbohrung und Zylinderzahl bei Höhenmotoren

Außer den vorstehend betrachteten rein baulichen Gesichtspunkten ist bei der Wahl der Zylinderzahl und des Hubraumes für Motoren mit mechanisch angetriebenen Ladern auch die geforderte Höhenleistung zu berücksichtigen. Die mit dem Ladedruck zunehmende Ladetemperatur beeinflußt bei Ottomotoren den Klopfbeginn und damit die ausführbare Zylinderbohrung. In einem früheren Bericht des Verfassers sind die Zusammenhänge zwischen Zylinderzahl und Zylinderbohrung an zwei als Beispiel gewählten Motoren für 8 km Vollleistungshöhe von 750 und 1200 PS unter Voraussetzung der Verwendung normaler Kraftstoffe O. Z. 87 untersucht worden, so daß im einzelnen hierauf verwiesen werden kann [8]. Zusammenfassend hat diese Untersuchung ergeben, daß bei solchen Höhenmotoren eine zu starke Verkleinerung der Zylinderabmessungen zu baulich ungünstigen Zylinderzahlen führt, weil wegen des durch die zulässige Ladertemperatur von 77°C begrenzten Ladedrucks im Gebiet kleiner Zylinderzahlen die Bohrungen zunächst schnell, mit zunehmenden Zylinderzahlen dagegen sehr langsam abnehmen. In diesem Bereich können also die Vorteile, die sich durch Verkleinerung der Zylinderzahl ergeben, die rasch anwachsenden Nachteile der Vielzylinderigkeit kaum ausgleichen. Die Ergebnisse haben aber nur beschränkte Gültigkeit, da Kraftstoffe höherer Klopfestigkeit, z. B. O. Z. 100, und Dieselmotoren wegen ihrer Klopfunempfindlichkeit höhere Ladedrücke und -temperaturen als die hier zugrunde gelegten zulassen.

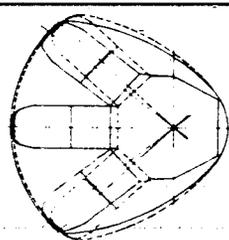
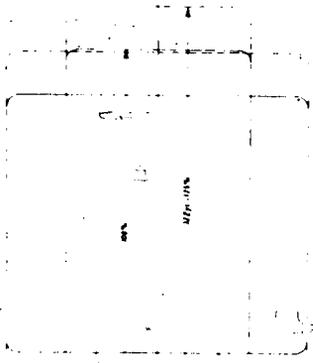
III. Gesichtspunkte für die Durcharbeitung der Konstruktion

1. Einfluß der Konstruktion auf das Baugewicht

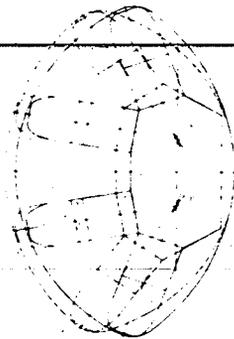
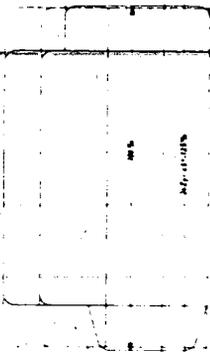
Neben der Zylindergröße beeinflussen das Baugewicht noch zwei weitere Kenngrößen, das Hubverhältnis und das Schubstangenverhältnis, deren Wahl dem Konstrukteur nicht immer freisteht. Diese werden unter Umständen durch das Verfahren, die Bauart und Zylinderanordnung mitbestimmt. Ihr Einfluß auf das Baugewicht ist von Bensing er geklärt worden [16, 17], so daß hier einige ergänzende Hinweise genügen. Bei Ottomotorien ist man heute allgemein bestrebt, das Hubverhältnis $\frac{h}{D}$ möglichst klein, d. h. möglichst = 1,0 zu machen. Bei den in Zahlentafel 1 zusammengestellten



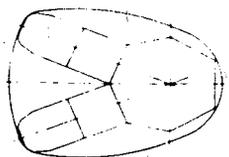
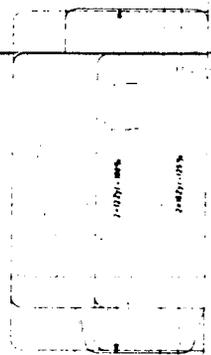
— Außen-Schulter
— Innen-Schulter
— Nabe



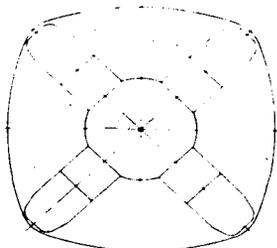
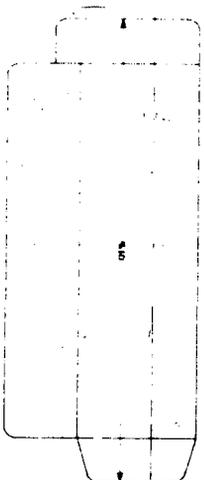
— Außen-Schulter
— Innen-Schulter
— Nabe



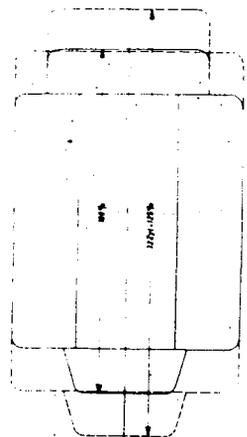
— Außen-Schulter
— Innen-Schulter
— Nabe



— Außen-Schulter
— Innen-Schulter
— Nabe



— Außen-Schulter
— Innen-Schulter
— Nabe



nisse, im allgemeinen nicht unter 1,30 erforderlich, weil sonst der Brennraum zu flach und hierdurch die Verbrennung und der Kraftstoff verschlechtert wird.

Beim Schubstangenverhältnis kann bei Reihenmotoren als untere Grenze $\frac{r}{l} = 1 : 3,2$, als obere $1 : 3,6$ angenommen werden. Man wird bestrebt sein, den kleinstmöglichen Wert auszuführen; denn der Einfluß der vom Kolben auf die Zylinderlaufbahn ausgeübten Seitendrücke ist, wie Benseniger nachweist, bei einem einfachen Pleuel unwesentlich und daher zu vernachlässigen. Zwingen die Verhältnisse, wie z. B. bei W-Motoren mit angelenkten Pleueln, zu größeren Schubstangenverhältnissen, so ist in doppelter Hinsicht ein Mehrgewicht in Kauf zu nehmen. Die Hauptpleuel werden infolge der größeren Biegelast schwerer, was wiederum größere Gewichte zum Massenausgleich erfordert; die längeren Pleuel bedingen eine größere Bauhöhe des Gehäuses mit entsprechendem Mehrgewicht.

Die allgemeinen Konstruktionsregeln zur Erzielung eines kleinen Baugewichts im Flugmotorenbau sind hinlänglich bekannt. Die Formfestigkeit schwierig gestalteter Bauteile läßt sich vielfach erst im Dauerversuch ermitteln; erfahrungsgemäß sind bei der Prüfstandentwicklung Gewichtserleichterungen zu erzielen, sei es durch Verwendung spezifisch leichterer Werkstoffe, z. B. Elektron an Stelle von Silumin, sei es durch planmäßige Erleichterung einzelner Bauteile und ihre Prüfung unter Überlast. Im folgenden seien jedoch noch einige besondere Hinweise gegeben.

Für Kurbelgehäuse, Zylinderblöcke, Zylinderköpfe und Kühloftumpfen größerer flüssigkeitsgekühlter Reihenmotoren, die früher noch aus RR-Legierungen gegossen waren, kommt nur Silumin Gamma, für Gehäuse kleinerer Reihenmotoren Elektron A 9 V als Baustoff in Frage. Ob für sehr starke Motoren eine Ausführung der Kurbelgehäuse in Stahl wie bei großen Sternmotoren oder in geschweißter Ausführung wie bei Hochleistungsschiffmotoren Vorteile bringt, bedarf der Klärung. Für die Deckel der Kurbelwellengrundlager ist gepreßtes Duralumin oder eine gleichwertige Legierung nach Fliegnorm Nr. 3125 erforderlich; Kurbelgehäusedeckel werden zum Teil aus Durablech, zum Teil aus Elektron hergestellt. Für alle anderen Gußteile läßt sich Elektron, am besten in der vergüteten Legierung A 9 V verwenden, u. U. auch für die Nockenwellenlager. Getriebegehäusedeckel werden entweder aus gepreßtem oder aus gegossenem Elektron A 9 V gefertigt.

Neben der Kurbelwelle haben das Gehäuse und der Zylinderblock bzw. Zylinderkopf den Hauptanteil am Gewicht. Gewichtsersparnisse an diesen Teilen werden sich durch knappe Konstruktion des Motors hinsichtlich Länge und Höhe, und am Gehäuse durch klare Kräfteführung (Verrippung) erzielen lassen, Beispiel Abb. 7. Das Gelingen einer leichten Ausführung hängt also größtenteils vom Geschick des Konstrukteurs und seiner Erfahrung ab. Die Gehäusewände werden ohnehin in der geringsten mit normalem Ausschuß herstellbaren Stärke gegossen, die bei Außenwänden 4,5 bis 5 mm mit zulässigem Abmaß ± 1 mm beträgt. Die hohe Beanspruchung eines dünnwandigen Leichtmetallgehäuses wird durch Wölbung der Außenwände leichter beherrscht, eine Formgebung, die sich bei großen und kleinen Reihenmotoren bewährt hat. Auch eine Querverspannung des Kurbelgehäuses durch Zuganker oberhalb der Lagerbügel, entlastet das Leichtmetall von den Beanspruchungen durch die inneren Kräfte. Ein Berechnungsverfahren für diese immerhin nicht einfachen Gußstücke wurde trotz wiederholter Bemühungen noch nicht ermittelt. In Deutschland werden, wie die meisten ausgeführten Konstruktionen zeigen, größere Leichtmetallgußstücke, wie Kurbelgehäuse, Geräteträger usw., außen möglichst glatt gehalten und innen verrippt. Englische und französische Konstruktionen verrippen die Gehäuse

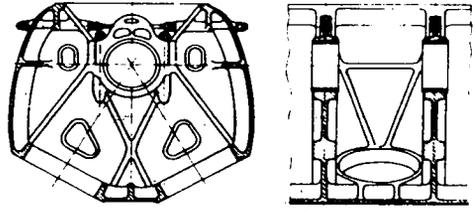


Abb. 4 Beispiel für die Formgebung und Verrippung im Quer- und Längsschnitt des Kurbelgehäuses eines V-Motors

vielfach außen stark, wodurch ein unruhiges Bild entsteht und die Motoren schwerer zu reinigen sind. Welche von diesen beiden Ausführungsarten gewichtlich vorteilhafter ist, wird sich allgemein kaum entscheiden lassen. Dagegen ermöglicht die Anwendung von Außenkokillen bei Silumin Gamma durch Erhöhung der Belastungsfähigkeit eine Gewichtsersparnis, die aber wegen der hohen Kosten nur bei großen Baureihen ausgenutzt werden kann; Beispiel: Gehäuse eines Jumo 211-Motors, hergestellt von VDM, Heddernheim, gezeigt auf der Automobil-Ausstellung 1939.

Durch Vermeidung von Schrauben läßt sich unter Umständen Gewicht sparen. Ein Vergleich, ob ein Motor, der in den Verbindungen von Gehäuse, Zylinderkopf ohne Schrauben ausgeführt ist, z. B. DB 601 und Hispano-Suiza, leichter wird, als einer der zum Zusammenbau dieser Teile Zuganker benötigt (Rolls Royce, Jumo 211), läßt sich nicht durchführen, da die Einzelgewichte der in Frage kommenden Teile nicht bekannt sind. Zweifellos werden jedoch Konstruktionen, mit ungeteiltem Zylinderblock und trockenen oder nassen Laufbüchsen leicht und festigkeitstechnisch günstig; sie ermöglichen einen zuverlässigen Aufbau des Motors, besonders wenn der Zylinderblock nicht durch einen Leichtmetallflansch und Stiftschrauben, sondern an den einzelnen Laufbüchsen durch Ringmuttern mit dem Gehäuse verbunden ist (DB 601). Bei dieser nur mit trockenen Laufbüchsen möglichen Verbindung dürfte allerdings der Vorteil des schraubenlosen Zusammenbaues zum Teil durch die doppelten Wände im Zylinderblock wieder aufgehoben werden. Die Bauart von Hispano-Suiza mit nassen Laufbüchsen und Flanschverbindung des Zylinderblocks mit dem Gehäuse wird jedoch keinen so starken Aufbau des Motors geben, wie die von Daimler-Benz und Junkers, was auch aus den kleineren spezifischen Leistungen hervorgeht, Zahlentafel 1. Allerdings mag hieran auch das niedrige Kurbelgehäuse beteiligt sein.

Die Abmessungen der Kurbelwelle werden zwar im wesentlichen durch die Drehchwingerrechnung festgelegt, aber auch die Durchbiegung der Welle im Betrieb muß wegen der Beanspruchung der Grundlager (Kantenpressungen) und der Verformung des Gehäuses berücksichtigt werden. Daß die Anschauungen der Praxis hierüber nicht einheitlich sind, geht daraus hervor, daß man heute sehr kräftig bemessene dreh- und biegesteife Kurbelwellen neben verhältnismäßig weichen findet. Die Erkenntnis, daß durch federnde Kupplungen zwischen Kurbelwelle und Luftschraube einerseits sowie zwischen Kurbelwelle und dem Lader- und Geräteantrieb andererseits die Grundschwingungszahl tief gelegt und praktisch ein von gefährlichen Resonanzen freier Betrieb erreicht werden kann [19], hat in der Praxis noch wenig Eingang gefunden. Hierdurch würden auch die Drehwechselbeanspruchungen von den Geräteantrieben ferngehalten, so daß diese leichter werden könnten. Obgleich bei einer solchen Anordnung die Kurbelwelle schwächer bemessen werden kann, zeigt doch die Erfahrung, daß man hier nicht zu weit gehen soll und daß eine biegungssteife Welle, die auch nicht zu Längsschwingungen neigt, be-

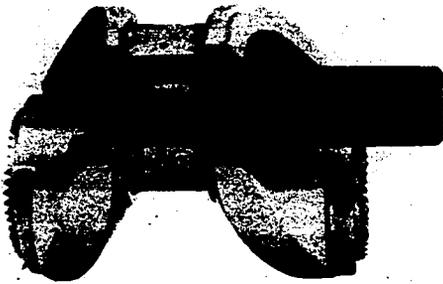
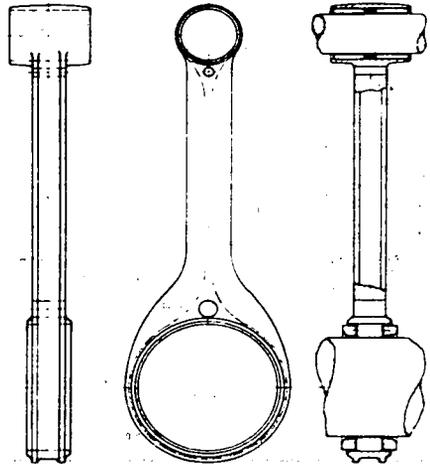


Abb. 5 Rollengelagerte Pleuelstange eines Hirth-Flugmotors

triebliche Vorteile hat. Daß wesentliche Erleichterungen bei einer solchen Welle durch starke tonnenförmige Ausbohrungen der Zapfen mit weichen Querschnittübergängen zu den Wangen möglich sind, zeigen die Forschungen der DVL über die Steigerung der Gestaltfestigkeit [20]. Im Einsatz gehärtete Zapfen der Kurbelwelle — die Anschußgefahr dürfte heute nicht mehr so groß sein — gestatten bei Einbau schmaler Rollenlager Gewichtersparnisse durch Verringerung der Baubreite (Hirth-Motoren, vgl. Abb. 5 a), aber auch bei Bleibronzeleitlagern können heute Pressungen bis 300 kg/cm² zugelassen werden. Die hohen Drehzahlen der neuzeitlichen Motoren erfordern jedoch Gegengewichte an der Kurbelwelle, teils zur Verringerung der Lagerbelastungen durch die Massenkkräfte, teils zur Verminderung der Gehäusebeanspruchung durch die inneren Momente (a. Abschnitt 3).

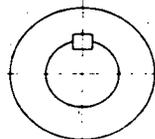
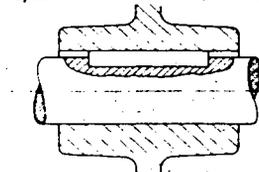
Im folgenden sollen durch einige Beispiele Anregungen für Gewichts-erleichterungen gegeben werden. Pleuelstangen in der allerdings nicht immer anwendbaren Bauform von Hirth lassen sich nach Abb. 5 b formsteif und besonders leicht ausführen. Bei Anfertigung aus Chrom-



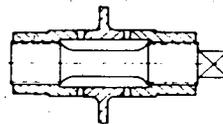
Molybdäneinsatzstahl ECMO 100 oder E 20 S (Fliegnorm Nr. 1408) und Einsatzhärtung der beiden Lageraugen kann, wie das Beispiel zeigt, ein besonderer Rollenlagerlaufing und eine eingepreßte Büchse für die Nadellagerung des Kolbenbolzens fortfallen.

Verbindungen kraftübertragender Bauteile z. B. von Wellen mit Zahnradnaben lassen sich mit dem K-Profil von E. Krause & Co., Wien bei einwandfreier Zentrierung und Kraftübertragung leichter und zuverlässiger ausführen als mit dem bisher üblichen Keilprofil, bei dem ein gleichzeitiges Tragen aller Keile nie sichergestellt ist, Abb. 6. Das Zusammenpressen zweier Teile mit Sicherung der Drehmomentübertragung durch Klauen gibt eine leichtere und bessere Verbindung als mit Paßfedern oder Keilprofil, Abb. 6. Erleichterungsmöglichkeiten für Schrauben zeigt Abb. 7. Bei Rollenlagerungen von Wellen kann, sofern sie aus Einsatzstahl

Paßfeder

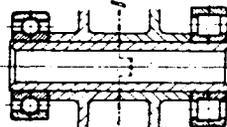
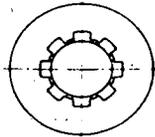
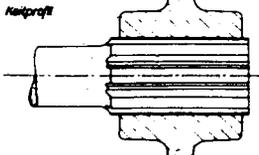


Hirth-Verzerrung u. Schraube mit Gewinde verschiedener Steigung



Paßverbindung mit Klauenkupplung

Keilprofil



Schritt A-B



K-Profil

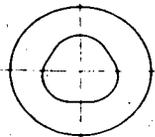
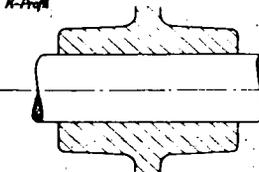


Abb. 6 Beispiele für Verbindungen kraftübertragender Bauteile

sind, der Innenlaufing fortfallen; ein Beispiel für ein erleichtertes Rollenlager zeigt Abb. 8.

Schrauben mit Differentialgewinde zum Zusammenbau von Teilen mit Stirnverzahnung geben zuverlässige Verbindungen, Abb. 6. Seegerringe lassen sich vielfach an Stelle von Schrauben zur Halterung der Außenringe von Wälzlagern verwenden.

Gewichtersparnisse sind ferner durch Leichtmetalllager zu erzielen, die von der Karl Schmidt G. b. m. H., von VDM und Junkers hergestellt werden. Lassen sich solche Lager heute auch noch nicht für Kurbelwellenlager von Flugmotoren verwenden, so ermöglichen sie doch den Ersatz der Bronze bei einer Reihe nebengeordneter Lager, z. B. der Nockenwellenlager. Auch Lager aus Elektron lassen sich, gehärtete und polierte Lagerzapfen vorausgesetzt, u. U. an diesen Stellen einbauen. Die Versuche, Leichtmetalllager für Kurbelwellen- und Pleuellager im Flugmotorenbau einzuführen, sind noch nicht abgeschlossen. Wenn ihre Notlaufeigenschaften verbessert sind, wird man in Zukunft wohl damit rechnen können: vielleicht sind auch Kunstharzlager, worauf Versuche der DVL hinweisen [20], aussichtsreich.

Viele andere Bauteile, die früher aus Stahl, Messing oder Bronze sein mußten, lassen sich durch Fertigung aus Dural, Durmes und ähnlichen Legierungen erleichtern, z. B. Stößelführungen, Büchsen und Abstandshülsen mit Wandstärken bis 0,75 mm, untergeordnete Schrauben und Muttern. Zahnräder niedrig beanspruchter Antriebe können u. U. aus Neomagnal hergestellt werden. Ölpumpen mit Gehäusen aus Elektron und Zahnräder aus Neomagnal geben eine besonders leichte Ausführung.

Die angeführten Beispiele lassen sich selbstverständlich noch durch zahlreiche andere ergänzen.

2. Einfluß der Konstruktion auf Betriebsverhalten und Fertigung

a) Der Kurbelgehäuse- und Zylinderbau

Falls für einen Entwurf keine bestimmten Vorschriften gegeben sind und es sich beispielsweise um einen V-Motor handelt, ist zu überlegen, ob ein stehender oder hängender Aufbau der Zylinder dem Verwendungszweck besser entspricht. Aus Zahlentafel 4 sind die wesentlichen Merkmale beider Anordnungen ersichtlich. Nach bisherigen in Deutschland gemachten Erfahrungen überwiegen die Vorteile der hängenden Bauart ihre konstruktiven und betrieblichen Nachteile so sehr, daß auch kleine luftgekühlte Motoren mit hängenden Zylindern ausgeführt werden, während England, Frankreich und Amerika die stehende Anordnung bevorzugen.

Von wesentlichem Einfluß auf die Fertigung und das Betriebsverhalten ist die Ausführung der Zylinder mit trockenen oder nassen Laufbüchsen. In Deutschland haben sich sowohl trockene (DB 601) wie auch nasse Laufbüchsen (Jumo 205, 210, 211) bewährt, während das Ausland nasse Laufbüchsen bevorzugt (Rolls Royce, Hispano-Suiza, Allison). Zylinderbauarten mit geschweißten Stahlblechkühlmänteln (BMW VI, Junkers L5) sind dagegen heute verlassen, weil der nachgiebige Aufbau mit einzeln stehenden Zylindern den höheren Dauerbeanspruchungen schnellläufiger überladener Motoren nicht mehr gewachsen ist und die Blechkühlmäntel manche Störungen verursachen können (Korrosion, Leckbildungen). Bei Leichtmetallkonstruktionen ist die wichtigste Aufgabe, die Zylinder gegen den Verbrennungsdruck und die Kühlstoffräume nach außen sowie gegen das Kurbelgehäuse zuverlässig abzudichten. Noch vor einigen Jahren war es schwierig, bei nassen Laufbüchsen mit Naturgummi-Dichtungsringen eine gute und haltbare Abdichtung des Kühlstoffs auch bei den hohen Temperaturen von etwa 140° C bei Glykolkühlung zu erzielen. Heute ist diese Frage bei Verwendung von temperatur-

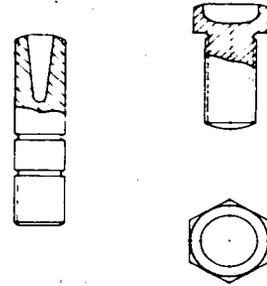


Abb. 7 Erleichterung von Schrauben

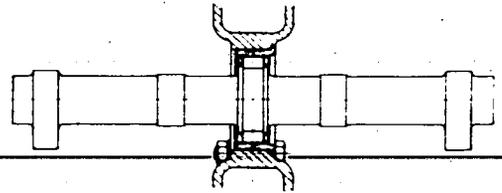


Abb. 8 Erleichterung von Rollenlagern

beständigem Buna (bei etwa 180° C) als Dichtungswerkstoff bei richtiger Anordnung der Dichtungsringe und Einhaltung der erforderlichen Abmässe in den Dichtungsnuten und im Kühlmantel einwandfrei gelöst.

Trockene Laufbüchsen haben den Vorzug unbedingter Dichtigkeit und Korrosionsfreiheit des Zylinderblocks und seiner guten Befestigungsmöglichkeit auf dem Kurbelgehäuse. Die doppelten Wände der Zylinder bewirken einen formfesten Aufbau des ganzen Blocks, der dadurch mechanisch hoch belastbar wird (Rennerfolge des DB 601). Der Zylinderblock wird jedoch durch seine Doppelwände mit den für den Kühlmantel notwendigen dünnwandigen Kernen gußtechnisch schwieriger als ein solcher für nasse Büchsen, der nur einfache Kerne für die Zylinderbohrungen erfordert. Der heute Stand der Leichtmetallgießertechnik ermöglicht es, diese immerhin nicht einfachen Gußstücke auch für den Großreihenbau einwandfrei dicht und mit genügender Festigkeit herzustellen. Infolge des ungünstigeren Wärmeübergangs durch 2 Zylinderwände wird etwas weniger Wärme an den Kühlstoff, dagegen mehr an Öl abgeführt, wie Versuche gezeigt haben. Die Zylinderlaufbüchsen, im allgemeinen nicht über 2,5 mm stark, müssen bei einer Temperatur von etwa 200° C des Leichtmetallblocks, der mit Rücksicht auf die Vergütung nicht höher erwärmt werden darf, mit einem durch die Erfahrung bestimmten und im Einzelfall neu zu ermittelnden Übermaß der Lauf-

Zahlentafel 4 Konstruktive und betriebliche Merkmale von Reihenflugmotoren mit hängenden und stehenden Zylindern

	Hängemotor	Standmotor
Einbau bei einmotorigen Zellen	Gute Anpassung an Rumpfquerschnitt, da Motor oben schmal, unten breit	Schlechtere Anpassung an Rumpfquerschnitt, da das Zylinder-V oben breit ausläßt
Sicht bei einmotorigen Zellen	Gut, (siehe a), geringe Blendung des Flugzeugführers beim Nachtflug, da Auspuff unten	Schlechter, (siehe a), u. U. Blendung des Flugzeugführers beim Nachtflug durch oben liegenden Auspuff
Lage der Luftschraube und Motorverkleidung	Motorverkleidung symmetrisch; da Stirnradgetriebe nach unten baut, liegt Luftschraube etwa in der Mitte	Motorverkleidung asymmetrisch; Luftschraube liegt jedoch etwas höher
Zugänglichkeit und Wartung	Bei einmotorigen Zellen gut, bei mehrmotorigen mit hochliegendem Triebwerk etwas schlechter	Bei einmotorigen Zellen gleich gut, bei mehrmotorigen ist Zugänglichkeit von oben besser
Geräte	Geräteträger verdeckt hintere Zylinder, besonders wenn Schußkanal erforderlich	Bessere Zugänglichkeit zu den hinteren Zylindern, da Geräte, Lader und Vergaser mehr nach unten bauen
Ölrückförderung	Öl muß aus dem Getriebe, dem Gehäuse-sumpf sowie aus den Zylinderhauben vorne und hinten abgesaugt werden, dadurch mehr Leitungen und u. U. Neigung zu Olschaumbildung	Öl läuft von selbst aus der Steuerung in Gehäusesumpf zurück, dadurch nur zwei Absaugstellen vorne und hinten im Gehäuse erforderlich
Wärmeabgabe aus Öl	Durch Spritzöl werden zwar Kolben zusätzlich gekühlt, aber das Öl wird mehr aufgeheizt	Geringere Aufheizung des Schmieröls durch Kolben
Verölung	Kerzen und Düsen (bei Benzin-Einspritzung) neigen zum Verölen, da bei Stillstand des Motors Öl in den Brennraum gelangen kann	Kerzen und Düsen neigen nicht zum Verölen

büchse — Größenordnung etwa 0,2 mm — eingeschrumpft werden. Zum Einschrumpfen selbst ist die Verwendung eines graphithaltigen Gleitmittels (Auto-Kollag) zu empfehlen. Sattete Anliegen der Laufbüchse ist nicht nur für einwandfreien Wärmeübergang, sondern auch zur Verhinderung des Eintritts von Verbrennungsgasen zwischen Stahl- und Leichtmetallwand notwendig. Ein Beispiel einer trockenen Laufbüchse zeigt Abb. 9 a. Trockene Laufbüchsen können erst nach dem Einsetzen fertig geholt werden.

Für die zuverlässige Abdichtung einer nassen Laufbüchse gegen das Gehäuse sind 2 Dichtringe aus Buna von tonnenförmigem Querschnitt erforderlich, Abb. 9 b (Lieferfirma: Veritas, Gelnhausen). Das Volumen der Nuten muß um etwa 30 vH größer sein, als dem Anfangszustand der Ringe entspricht, um deren Quellen bei höheren Temperaturen im Betrieb Rechnung zu tragen. Am Bund zwischen beiden Ringen ist die Anordnung einer kleinen Nut, im Kühlmantel selbst eine Ablaufbohrung nach außen für etwa durchtretenden Kühlstoff zu empfehlen. Der Durchmesser des Nutgrundes und das Übermaß der in die Nut eingelegten Ringe, die keinen von der Form herrührenden Grat aufweisen dürfen, ist durch Versuch so zu bestimmen, daß die dünnwandige Laufbüchse, die im allgemeinen 2,5 bis 3 mm stark ist, beim Einsetzen nicht verdrückt und unrund wird; das Übermaß wird etwa 0,1 bis 0,2 mm betragen. Ebenso muß auch der Durchmesser der Bunde, deren Passung zwischen $isa\ h 6$ und $isa\ f 7$ liegt, ermittelt werden, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Seitendrucke durch die Bunde übertragen werden müssen. Eine Unrundheit der Büchse von 0,02 bis 0,03 mm kann als zulässig angesehen werden. Es ist jedoch anzustreben, die Büchsen vor dem Einsetzen in den Zylinderblock fertig zu honen. Falls es die Platzverhältnisse gestatten, ist nach Abb. 9 b eine Ausparung hinter der Dichtfläche am Kühlmantel zweckmäßig zur Kühlung der Ringe und zur Erreichung einer gewissen Nachgiebigkeit. Zum Einsetzen der Büchsen empfiehlt es sich, die Ringe mit Schmierseife zu behandeln; beim Ausbau der Büchse werden sie meistens zerstört und sind auszuwechseln. Sorgfältige Prüfung der Ringe unter Betriebsbedingungen ist notwendig, wie die Erfahrungen von Junkers lehren [22].

Gegen den Verbrennungsdruck werden nasse Laufbüchsen durch achmale Weichkupfer- oder Weichaluminiumringe abgedichtet, wobei die Büchsen entweder durch Zuganker gegen die Dichtfläche gespannt oder wie bei Hispano-Suiza in den oberen Teil des Zylinderblocks eingeschraubt werden. Ein Verkadmen der Kupferringe hat sich gut bewährt, teilweise wird auch die der Büchse zugekehrte Dichtfläche leicht abgeschragt. Während eine Konstruktion wie die von Rolls-Royce, bei der alle Zylinder durch lange Zuganker zwischen dem Gehäuse und

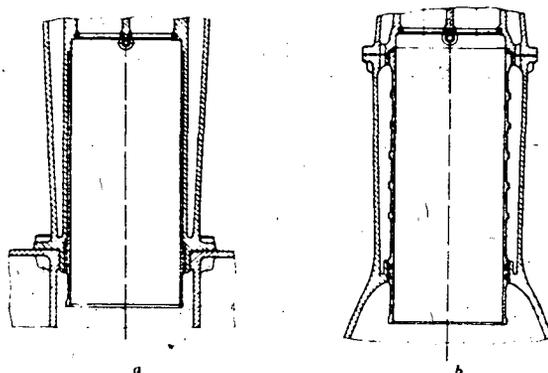


Abb. 9 Beispiel einer trockenen (a) und einer nassen (b) Zylinderlaufbüchse

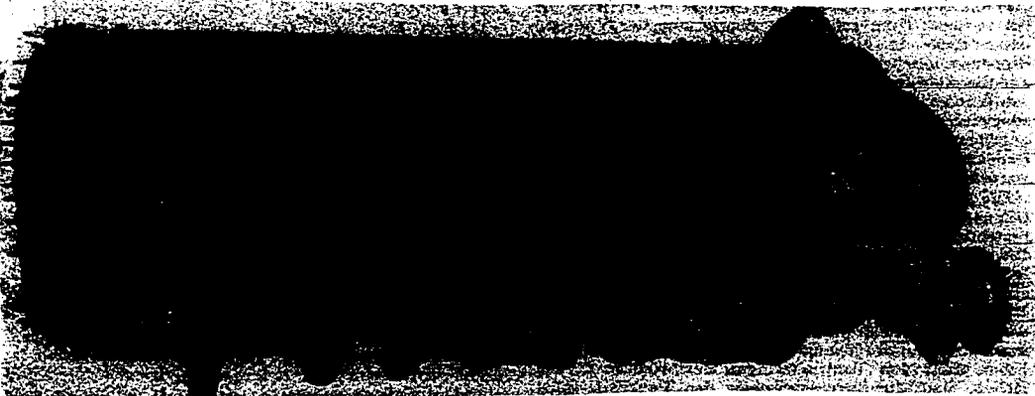


Abb. 10 Kurbelgehäuse eines neuzeitlichen Reihenmotors, vorn und hinten geschlossen. De Havilland Gipsy 12

dem gemeinsamen Zylinderkopf mit Kühlmantel verspannt werden, sehr enge Toleranzen für die Höhe der Laufbüchsen zwischen den Auflageflächen oder Paßarbeit erfordert, gestattet die Bauart von Junkers eine einfachere Fertigung, da hier jede Büchse durch 4 federnde Zuganker einzeln gegen den Zylinderkopf gespannt wird und sich in gewissen Grenzen einstellen kann; das Fertigen oder schleifen muß in eingespanntem Zustand erfolgen. Dünnwandige nasse Laufbüchsen, die sich unter dem Verbrennungsdruck verformen, werden zweckmäßig im oberen Teil mit radialen Verstärkungsrippen versehen, Abb. 9 b, bei früheren geschweißten Ausführungen wurde oben ein kegelförmiger Übergang nach dem Brennraum hin vorgesehen. Korrosionsschutz der Büchsen und im Wasser liegender Zuganker durch ein geeignetes Verfahren (Bondern) oder Verkadmen ist zu empfehlen. Durch den besseren Wärmeübergang der nassen Laufbüchsen wird nach Versuchen etwas mehr Wärme an den Kühlstoff abgeführt als ans Öl. Solche Motoren werden also mit kleineren Ölkühlern auskommen.

Sowohl bei Zylinderkonstruktionen mit trockenen als auch bei solchen mit nassen Laufbüchsen muß sich der Kühlmantel in Richtung der Zylinderachse bei der Erwärmung im Betrieb frei dehnen können. Eine Verhinderung dieser Dehnung durch Verspannung des Kühlmantels zwischen Gehäuse und Zylinderkopf kann zu Ribbildungen im Leichtmetall führen. Ein Vergleich der in dieser Hinsicht vorbildlichen Ausführungen von Daimler-Benz und Rolls-Royce zeigt, daß sich im ersten Fall der Zylinderblock nach außen, im letzteren Fall der Kühlmantel nach innen verlängern kann.

Neuzeitliche luftgekühlte Reihenmotoren beherrschen die Wärmedehnung des Stahlzylinders mit seinem Leichtmetallkopf durch Einzelbefestigung der Zylinder auf dem Gehäuse mit einem Flansch am unteren Ende der Laufbüchse; der Zylinderkopf ist dabei wie bei Sternmotoren mit Gewinde aufgeschraubt (As 410 c). Die außerdem vielfach bei kleineren Motoren ausschließlich gebräuchliche Verbindung von Gehäuse und Zylinder mittels langer Zuganker, durch die der Zylinderkopf gegen die Laufbüchse gespannt und durch einen Kupfering abgedichtet wird, erfordert eine sorgfältige Abstimmung der Dehnung von Zugankern und Laufbüchse, damit letztere nicht unrund wird. Unter Umständen wird für die Zuganker ein Sonderwerkstoff von höherer Wärmeausdehnung (Chrom-Manganstahl) zu empfehlen sein. Nach Christian ist diese Konstruktion für höhere Hubraumleistungen überladener luftgekühlter Flugmotoren nicht mehr geeignet [23].

Ebenso wie in Richtung der Zylinderachse soll eine freie Wärmedehnung des verhältnismäßig langen Kurbelgehäuses und Zylinderblocks in der Kurbelwellenachse möglich sein, damit keine zusätzlichen Beanspruchungen entstehen, die Risse oder Verzug hervorrufen können. Die Verlängerung des 1,0 bis 1,30 m langen Gehäuses oder Zylinderblocks eines 12 Zylindermotors kann je nach der Betriebstemperatur bis 1,5 mm erreichen, wobei sich der Zylinderblock oder -kopf infolge seiner höheren Betriebstemperatur immer mehr dehnen wird als das Gehäuse. Bei bewährten Konstruktionen ist dieser Dehnungsmöglichkeit in verschiedener Weise Rechnung getragen. Bei einer Befestigung des Zylinderblocks mit Ringmuttern nach Daimler-Benz ist ein Wandern desselben auf dem Gehäuse ohne weiteres möglich, während bei einer Verbindung mit Stiftschrauben und Flansch nach Hispano-Suiza Biegebeanspruchungen der Schrauben sich nicht vermeiden lassen; es ist jedoch nicht bekannt, wie diesem Umstand Rechnung getragen ist. Auch bei der Zylinderblockverspannung von Rolls-Royce und Allison muß mit Durchbiegungen der langen Zuganker gerechnet werden. Praktische Erfahrungen hierüber sind jedoch in Deutschland nicht bekannt. Bei Junkers können sich die Laufbüchsen in gewissen Grenzen zum Zylinderkopf einstellen, falls sich der Zylinderkopf mehr dehnt als der Kühlmantelteil des Gehäuses.

Ein wichtiger Gesichtspunkt, besonders für einen erschütterungsfreien Lauf des Motors ist eine starre, verdreh- und biegesteife Ausführung des Kurbelgehäuses, auf die Berger hinweist [24]. Bei früheren Konstruktionen, bei denen das Gehäuse noch nicht genügend hoch und steif ausgebildet wurde, war namentlich bei Einzelbefestigung der Zylinder die Belastungsgrenze durch die Erschütterungen und das Reißen der Befestigungsstiftschrauben bedingt. Neue Konstruktionen erreichen ein genügendes Widerstandsmoment durch eine konstruktiv größtmögliche Bauhöhe und begegnen dadurch und durch Gegengewichte der Kurbelwelle der Verformung des Gehäuses unter der Einwirkung der Massenkräfte und der inneren Momente. Am besten entspricht dieser Forderung eine Gehäuseblockkonstruktion mit bis an die Zylinderköpfe hochgezogenen Wänden (Junkers) oder ein fester Verband von Gehäuse und Zylinderblock (Daimler-Benz). Zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Gehäuses ist außer der bereits geschilderten Wölbung oder Diagonalverrippung der Außenwände, zu empfehlen, das Gehäuse vorn und hinten mit geschlossenen Abschlußwänden zu versehen, sofern der Einbau der Kurbelwelle dies gestattet, Abb. 10. Selbstverständlich muß durch die Ausführung der Gehäuse-

querwände und der inneren Verrippung ein weiteres getan werden. Dazu gehört die Überleitung der Verbrennungsdrücke in die Querwände durch zugbandartige Rippen möglichst ohne zusätzliche Biegebeanspruchung und die Anordnung von Längs- und Querrippen zwischen den Wänden, Abb. 4. Die in den Querwänden zum Druckausgleich zwischen den einzelnen Gehäusekammern vorgesehenen Öffnungen müssen zur Verminderung der Randspannungen mit Verstärkungswülsten umgeben werden.

Die Wandstärke des Zylinderbodens, der infolge der Öffnungen für die 4 Ventile eigentlich nur aus Stegen besteht, kann bei Ausführung in Silumin Gamma etwa $D/6$ bis $D/7$ betragen. Für die Wände der Ein- und Auslaßkanäle, die gleichzeitig den ganzen Zylinder versteifen müssen, ist aus gußtechnischen Gründen mit Rücksicht auf Dichtigkeit und Kernversatz eine Stärke von 5 mm erforderlich, während bei den Außenwänden bis auf 4 mm hinuntergegangen werden darf. Der Zylinderboden samt den Ventilsitzringen darf sich nicht verziehen, und die Stege zwischen den Ventilsitzringen dürfen nicht reißen. Die Gefahr eines Verziehens des Zylinderbodens besteht unter Umständen durch einseitige Überhitzung auf der Auslaßseite und ist um so größer, je höher die Wärmebelastung des Motors ist (Überladung, hohe Kühlstofftemperatur). In solchen Fällen ist durch verstärkte Wärmeabfuhr auf der Auslaßseite für eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung zu sorgen; denn wenn die Wandtemperatur längere Zeit 200° und mehr erreicht, verliert das Silumin Gamma seine Vergütungsfestigkeit, und der Werkstoff wird dann nachgiebig. Die Brinellhärte des Silumin Gamma soll 100 bis 110 betragen, wenn sie auf 70 bis 80 abgesunken ist, ist der Vergütungseffekt verloren. Die Kühlung kann durch Verrippung oder durch erhöhte Wassergeschwindigkeit an den gefährdeten Stellen verbessert werden, z. B. läßt sich durch zusätzliche Kühlstoffzufuhr mit einem Rohr dort eine bessere Wärmeabfuhr bewirken, eine Maßnahme, die sich auch bei hochbelasteten Fahrzeugmotoren bewährt hat. Die Räume zwischen den Kanälen dürfen in keinem Fall zusammengegossen werden, sondern es müssen Kerne von mindestens 6 bis 8 mm dazwischenbleiben, Abb. 11. Zum Reinigen, insbesondere zum Entfernen der Gratreste und zum Prüfen dieser Stellen müssen in der Außenwand des Zylinders Kernputzlöcher vorgesehen werden.

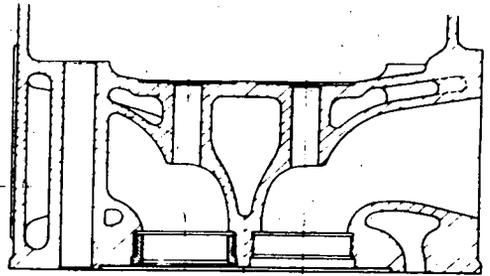


Abb. 11 Querschnitt durch eine Zylinderkopfausführung

Auch an den Stellen, wo die Wände der Verbrennungsräume zweier benachbarter Zylinder zusammenstoßen, ist durch Bohrungen oder eingegossene Kanäle für Kühlstoffdurchfluß zu sorgen, da sich sonst örtlich zu hohe Temperaturen einstellen, die einen Verzug oder Reißen durch Warmespannungen zur Folge haben können. Beispiel: Rolls-Royce Merlin, Abb. 12.

Die von Zejns für die Ausbildung von Ventilsitzen im allgemeinen gegebenen Richtlinien [25], sollen hier durch einige Hinweise für die Zylinderkonstruktion ergänzt werden. Meistens werden die in Abb. 13 dargestellten 3 Ausführungen verwendet:

1. Eingeschraubter und eingeschumpfter Ring mit Konus zum Abdichten gegen die Verbrennungsgase (Rolls-Royce).
2. Zylindrisch oder mit schwachem negativem Konus eingeschumpfter Ventilsitz.
3. Kegelig kalt eingezogener Ventilsitz, innen umgewalzt.

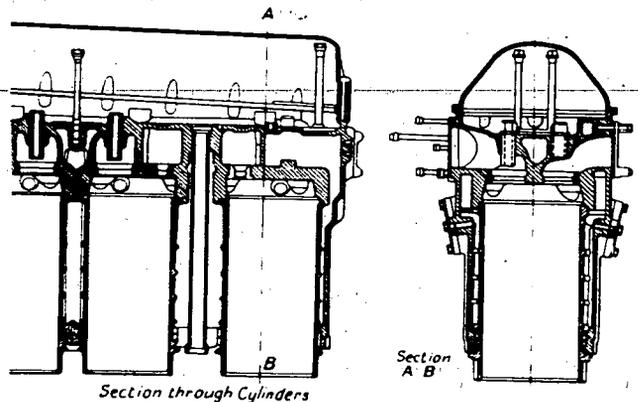


Abb. 12 Längsschnitt durch den Zylinderblock des Rolls-Royce Merlin



Abb. 13 Ventilsitzausführungen bei flüssigkeitsgekühlten Flugmotoren

Bei allen 3 Ausführungen dürfen die Stege zwischen den Ventilsitzen nicht unter 7 bis 8 mm werden, da sonst das Leichtmetall reißt. Die Ventilsitze nach 1. und 2. wurden früher teilweise mit Trockeneis unterkühlt und bei Normaltemperatur des Zylinders eingezogen, während jetzt der Zylinder oder Zylinderkopf kurzzeitig auf 180 bis 200° erwärmt wird — wodurch die Vergütung nicht verlorengeht — und die Ringe bei Normaltemperatur eingeschrampt werden. Das Schruppübermaß richtet sich nach dem Durchmesser der Ventilsitze und muß durch Versuch ermittelt werden. Bei wassergekühlten Zylinderköpfen beträgt es nach Angabe der Firma Rautenbach 0,15 vH des Ventilsitzdurchmessers. Während man bisher die Ringe aus geschmiedeter Aluminium-Nickel-Bronze (Zoller-Bronze B, Aeterna WF 28) mit ähnlicher Verformungszahl wie Leichtmetall (16.10—4 je °C) gefertigt hat, baut man neuerdings bei hochbelasteten Motoren mit Rücksicht auf Verschleiß und Korrosion gepanzerte Stahlsitze ein, worüber Banks berichtet [28]. Die Lebensdauer der Ventilsitze ist verschieden, je nach den Betriebsverhältnissen, eingeschraubte Ringe können leichter ausgewechselt werden, wenn sie verzogen oder beschädigt sind. Für Ventillführungen, besonders für Ventile aus austenitischem Stahl (WF 100), hat sich Kuprodukt bestens bewährt.

Bei langen kraftübertragenden Stiftschrauben in Gehäusen für Kurbelwellengrundlager oder für die Zylinderkopfbefestigung ist das Gewinde im Leichtmetall als Grobgewinde auszuführen (Steigung 1,5 bis 2 mm) und 5 bis 10 mm tief zu versenken, damit im Auge ein größerer Querschnitt herangezogen wird. Die Gewindelänge wird 2,5 bis 3 · d, und es ist zu empfehlen, im Grunde der Bohrung ein kleines Entlüftungslöchchen nach außen vorzusehen. Bei langen Stiftschrauben ist am äußeren Ende ein Vierkant zum Gegenhalten vorteilhaft, um die Schraube beim Anziehen nicht zu stark zu verdrehen. Das Einschrauben erfolgt am besten mit Bleiweiß.

b) Kurbelwellenlagerung und Untersetzungsgetriebe

Wegen der Längadehnung des Kurbelgehäuses müssen die Kurbelwellengrundlager seitlich hinreichend Spiel haben, und zwar ist je nach Länge des Motors zwischen Kurbelwangen und Lagerendflächen mindestens 1,5 bis 2 mm Spiel vorzusehen; „ausgenommen“ beim Führungslager. Letzteres ist bei kleineren Reihenmotoren teilweise das vordere Endlager der Kurbelwelle, während bei großen Reihenmotoren meist das Mittellager als Paßlager ausgebildet wird. Die relative Verschiebung der Kurbelwelle zum Gehäuse im Betriebe ist dann kleiner als bei Führung der Welle in einem Endlager. Das bei öftlich gekrüppften Wellen durch die Massenkraften von zwei gleichgerichteten Kurbeln höher belastete mittlere Grundlager wird zweckmäßig etwas breiter gehalten, um die zulässige Pressung nicht zu überschreiten. Die erhöhte Gehäusebeanspruchung wird durch Verstärkung der mittleren Gehäusequerwand aufgenommen, die, wenn möglich, als Doppelwand ausgebildet werden sollte. Die Grundlagerdeckel werden entweder mit kreisförmigen oder geraden Flächen senkrecht zur Kurbelwellenachse ins Gehäuse eingepaßt und, falls erforderlich, durch Paßstifte gegen Verschieben gesichert. Die bereits erwähnte Verspannung des Gehäuses durch Zuganker, die teils oberhalb der Lagerdeckel teils durch dieselben quer durchs Gehäuse gehen, entlastet das Leichtmetall von den Querkräften, Abb. 4.

Bei den Stirnradgetrieben für die Luftschaube, die große Reihenmotoren heute ausnahmslos aufweisen, werden die Getrieberitzel meist unabhängig von der Kurbelwelle in 2 Rollenlagern gelagert; das Drehmoment wird durch einen beiderseits mit Keilprofil versehenen „Knüppel“ übertragen. Die Durchbiegun-

gen des vorderen Kurbelwellenendes werden somit von den Zahnrädern ferngehalten, Abb. 14. Seltener ist das Getrieberitzel unmittelbar auf der Kurbelwelle befestigt (Junkers Juno 211). Zur Aufnahme der an der Luftschaubewelle wirkenden Querkräfte dienen normale Rollenlager; der Schraubenschub stützt sich auf ein vorn angeordnetes Radiallager ab. Während die Aufnahme des Schraubenschubs nicht schwierig ist, muß die Lagerung den Kräftekräften der Luftschaube gewachsen sein; die Abstände der beiden Querslager dürfen daher nicht zu kurz sein. Zur hinreichenden Schmierung der einsatzgehärteten und mit besonderem Schliß hergestellten Stirnräder aus ECN oder ECMo sind Ölspritzdüsen anzuordnen, die meist vor den Eingriff spritzen. Das Öl muß entweder vorn abgesaugt oder in den Gehäusesumpf zurückgeleitet werden. Die großen Getrieberäder werden entweder aus einem Stück mit der Luftschaubewelle gefertigt oder mit Keilprofil auf diese aufgesteckt. An Stelle der Flanschverbindung von Luftschaube und Getriebewelle, bei der die Zentrierung und Drehmomentübertragung durch Stirnverzahnung erfolgt, wird jetzt wegen der Luftschaubeverstellung wieder die zylindrische Welle mit Keilprofil bevorzugt. Das Getriebe für den Antrieb des Reglers der Verstellluftschaube wird im allgemeinen vorn am Getriebe angeordnet. Falls eine federnde Kupplung zwischen Motor und Luftschaube notwendig ist, wird diese zweckmäßig im großen Getrieberad unterzubringen sein, sofern sich die erforderliche Federung, die meist mehrere Grad trägt, dort konstruktiv erzielen läßt, z. B. durch zwischen Schraubewelle und Radkranz angeordnete Schraubenfedern.

Der Radkasten, in dem das große Getrieberad umläuft, ragt bei den üblichen Untersetzungsverhältnissen von etwa 1 : 0,5 meist über das Kurbelgehäuse hinaus und muß deshalb sicher gegen dieses abgestützt und innen gut verrippt werden, Abb. 15. Bei Motoren mit bis an die Zylinderköpfe hochgezogenem Kurbelgehäuse läßt sich diese Aufgabe leichter erfüllen. Die bei verschiedenen Getriebeauführungen am Gehäuse wirkenden Kräfte sind an anderer Stelle behandelt [27], ebenso die Getriebeberechnung, so daß hier nicht darauf eingegangen wird. Bei einigen neuen luftgekühlten Reihenmotoren mit Umlaufgetrieben wird die Gehäusebeanspruchung durch das Drehmoment durch Zwischenschaltung einer Federung zwischen dem feststehenden Teil und dem Gehäuse vermindert, Abb. 16. Der Einfluß

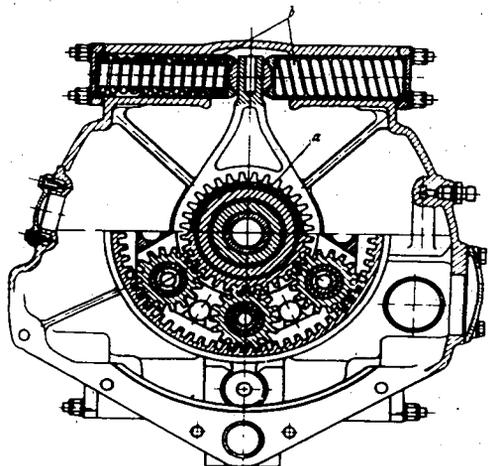


Abb. 14 Stirnradgetriebe eines flüssigkeitsgekühlten Reihenmotors (Rolls-Royce Merlin)

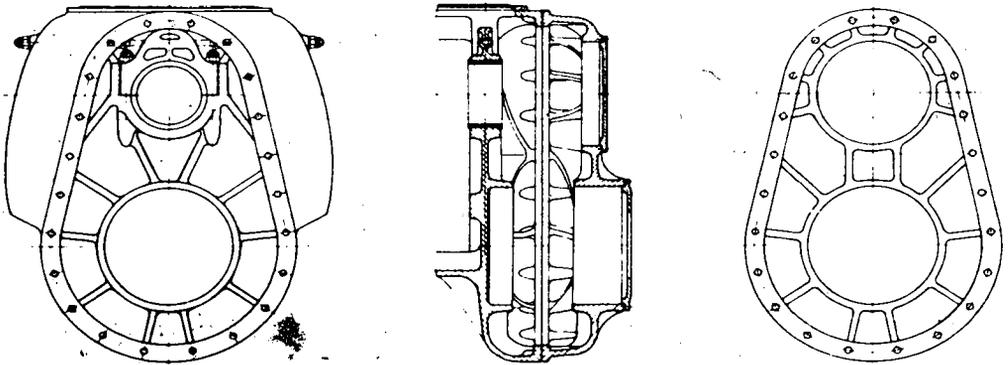


Abb. 15 Beispiel für die Ausführung des Getriebehäuses bei einem Reihenmotor

einer solchen Anordnung auf die Schwingungsverhältnisse ist von Behrmann behandelt [28].

Die Ausführung eines Getriebes für verschiedene Drehrichtungen, also Rechts- und Linkslauf der Schraube, erfordert besondere konstruktive Maßnahmen am Kurbelgehäuse und Getriebehäusedeckel mit einem entsprechenden Mehrgewicht. Bei Stirnradgetrieben ist eine Umkehr der Drehrichtung durch den Einbau von Zwischenrädern grundsätzlich möglich. Die Getriebekonstruktion mit Achsenabständen, Zahnzahlen und Teilung der Räder müßte so ausgeführt sein, daß sich der Abstand der Luftschraubenwelle von der Kurbelwelle bei beiden Drehrichtungen nicht ändert. Zahnzahlen und Teilungen werden in beiden Fällen verschieden sein. Ausführungsbeispiele liegen hierfür noch nicht vor, ebenso wie für zwei- oder mehrgängige Schaltgetriebe. Gegenläufige Propeller sind bisher nur bei ganz wenigen Motoren im Betrieb; mit zunehmender Triebwerkleistung werden sie jedoch an Bedeutung gewinnen. Bei Motoren mit 2 Kurbelwellen, Doppel-V- und H-Motoren wird die Konstruktion des Getriebes leichter als bei einem Motor mit einer Welle. Abb. 17 zeigt das Schema eines solchen Getriebes vom Motor S. N. C. M. Sterna [29].

3. Kinematische und dynamische Verhältnisse im Kurbeltriebwerk und Massenausgleich

Bei der Wahl einer Bauart für einen Neuentwurf sind neben den zu erwartenden Drehschwingungen, der

Kräfte- und Bewegungsverlauf im Kurbeltrieb und der erreichbare Massenausgleich mit entscheidend. Über die grundsätzlichen Fragen, die hierbei zu berücksichtigen sind, steht ausführliches Schrifttum zur Verfügung. Im folgenden sollen daher nur einige für den Flugmotorenbau wichtige Überlegungen angestellt werden.

Bei V-Motoren findet man heute fast ausnahmslos gabelte Pleuelstangen. Die Vorteile gleicher Kolbenwege in beiden Zylinderreihen (symmetrische Totpunkte, geringere Beanspruchung des Hauptpleuels) und die günstigeren Schwingungsverhältnisse (z. B. Wegfall der Kritischen 3. Ordnung) sind für das Betriebsverhalten bei Flugmotoren so wesentlich, daß man den Nachteil der schwierigeren und teureren Herstellung der Gabelpleuel in Kauf nimmt. Angelenkte Nebenpleuelstangen lassen sich jedoch bei Drei- und Vierreihenmotoren nicht vermeiden, da die verfügbare Lagerbreite es nicht gestattet, mehr als 2 Pleuellager nebeneinander auf einem Zapfen anzuordnen, wie dies bei kleineren Reihenmotoren mit schmalen Rollenlager möglich ist (Hirth HM 512). Bei Festlegung der Anlenkpunkte ist besonders darauf zu achten, daß der Unterschied der Hübe der angelenkten Kolben gegenüber dem des Hauptpleuels nicht zu groß wird, und daß keine oder höchstens ganz unwesentliche rückdrehende Momente auf den Kurbelzapfen wirken. Nallinger [30] zeigt die Pleuelstangenausführungen eines 18 Zylinder-W-Motors und eines 24 Zylinder-X-Motors mit den resultierenden Lagerdrücken. Abb. 18 und 19 geben Beispiele für die Bewegungsverhältnisse der Anlenkpunkte solcher Motoren. Der Unterschied in den Hüben ist außerdem vom Gabelwinkel abhängig, der bei Ottomotoren durch die erforderliche gleichmäßige Zündfolge mitbestimmt wird, während man bei Dieselmotoren hier weniger abhängig ist. Ein W-Motor muß

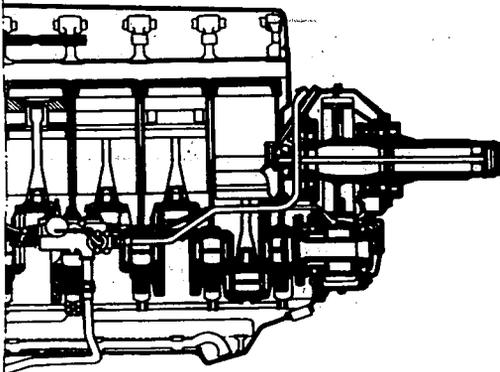


Abb. 16 Federrind abgestütztes Umlaufgetriebe des Motors Aa 410 c

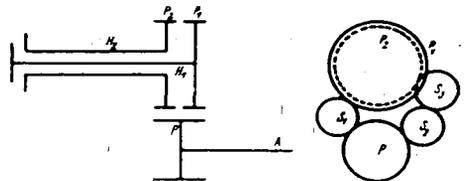


Abb. 17 Schema eines Getriebes für gegenläufige Luftschrauben. A Kurbelwelle, P Antriebsritzel auf der Kurbelwelle, P₁, H₁ Antriebsrad und Antriebswelle für erste Luftschraube, P₂, H₂ Antriebsrad und Antriebswelle für zweite Luftschraube, S₁, S₂, S₃ Zwischenräder

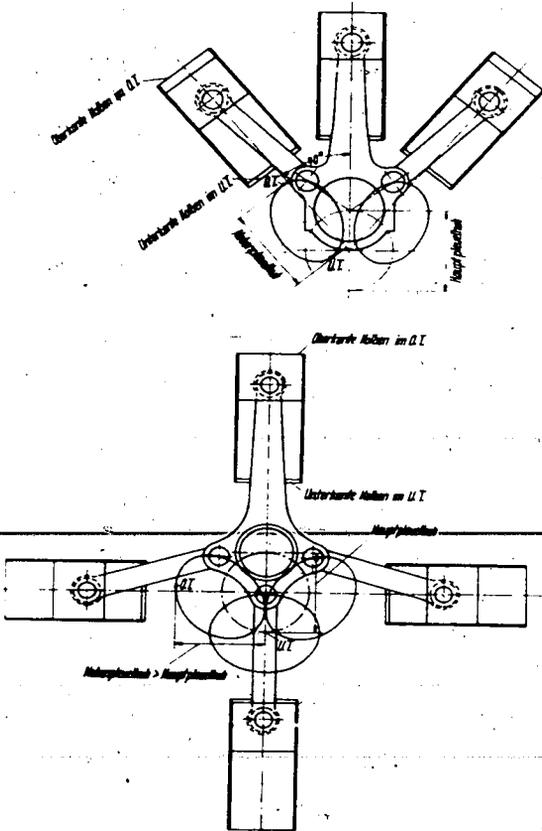


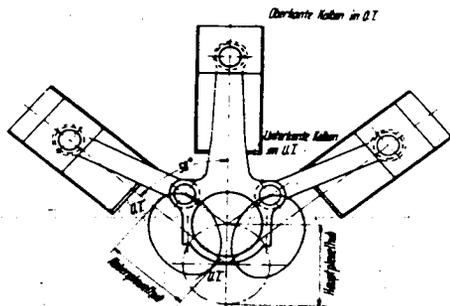
Abb. 19 Schema eines Kurbeltriebs eines X-Motors mit 90° Gabelwinkel

infolge des Weges, den der verhältnismäßig große Hauptpleuelkopf zurücklegt, etwas längere Pleuelstangen als ein V-Motor erhalten; dadurch wird auch die Bauhöhe vergrößert. Beim Vierreihen-X-Motor ist außerdem die Bewegung des Kolbens, der dem des Hauptpleuels gegenüberliegt, ungünstig, weil der Anlenkpunkt eine flach liegende Ellipse beschreibt, der Kolbenweg also im Bereich der höchsten Drücke sehr klein ist. Hierdurch wirken die Druckspitzen länger auf dieses Nebenpleuellager. Eine Untersuchung der Bewegungen und der resultierenden Lagerdrücke ist also bei solchen Triebwerken zur Ermittlung günstigster Betriebsverhältnisse immer erforderlich.

Für den Massenausgleich bei Flugmotoren gilt wie im allgemeinen Motorenbau die grundsätzliche Forderung, daß nur solche Kröpfungsfolgen brauchbar sind, die keine freien Massenkräfte und Massenmomente erster und zweiter Ordnung aufweisen. Die meist verwendeten 6fach gekröpften Kurbelwellen mit symmetrischer Kröpfungsanordnung für die aus Sechszylinderreihen aufgebauten V-, W- und X-Motoren erfüllen diese Forderung, während bei 4 Zylinder-Reihenmotoren und bei 8 Zylinder-V-Motoren — bei diesen jedoch nur bei ungünstigen Kröpfungsfolgen — freie Massenkräfte zweiter Ordnung vorhanden sind.

Bei Drehzahlen unter 2000 min⁻¹, die vor einigen Jahren bei manchen Baumustern nicht überschritten

Abb. 18 Schema des Kurbeltriebs eines W-Motors bei zwei verschiedenen Gabelwinkeln
Nebenpleuelhub bei 40° Zylinderneigung
Hauptpleuelhub < als bei 30° bei gleicher Hauptpleuelausbildung



wurden (BMW VI), waren im allgemeinen keine Gegengewichte an der Kurbelwelle nötig. Die große Schnelligkeit der neuzeitlichen 12 Zylinder-V-Motoren mit Drehzahlen bis zu 3000 min⁻¹ und darüber macht Gegengewichte zur Entlastung der Grundlager besonders der Mittelager von den Massenkräften und zur Verkleinerung der inneren Massenkraftmomente jedoch unentbehrlich. Sie wirken der Durchbiegung der Kurbelwelle entgegen und schonen das Kurbelgehäuse vor zu starken zusätzlichen Beanspruchungen. Gleichzeitig werden die nach außen wirkenden Erschütterungen vermindert.

Inwieweit dem Kurbelgehäuse die zusätzlichen Beanspruchungen durch die Massenkräfte zugemutet werden können, hängt von seiner Widerstandsfähigkeit ab; ein hohes und formsteifes Gehäuse wird sich in dieser Hinsicht besser verhalten.

In Abb. 20 sind einige Ausführungsbeispiele von 12 Zylinder-Kurbelwellen mit 6, 8 und 12 Gegengewichten dargestellt. Sechs Gegengewichte entsprechend der früheren Ausführung des Curtiss Superconquerer-Motors, Abb. 20 a), die hauptsächlich zur Entlastung des Mittelagers dienen, reichen, wie die Kurbelwellen der neuesten Baumuster zeigen, nicht mehr aus, da bei diesen die inneren Momente infolge Vergrößerung der Abmessungen oder Steigerung der Drehzahlen einen weitergehenden Ausgleich erfordern. Abb. 20 b) und c) zeigen Ausführungen des Rolls-Boycce Merlin und DB 601 mit je 8 Gegengewichten jedoch in etwas verschiedener Anordnung; bei Rolls-Royce an die Kurbelwangen angeschmiedet, bei Daimler-Benz angeietet. Angeschraubte Gegengewichte sind, obwohl in der Herstellung teurer, vorzuziehen, die verfügbare Wangenbreite reicht jedoch nicht immer für die erforderlichen Massen aus. Eine besondere Art des Ausgleichs hat Junkers beim Jumo 211 gewählt, Abb. 24 d), bei dem 12 angeschmiedete zum Teil abgekröpfte Gegengewichte zu einem möglichst vollständigen Momentenausgleich vorgesehen sind.

Ferner sind in Abb. 21 zwei Kurbelwellenauführungen der 8 Zylinder-V-Motoren Argus As 10 c [a] und Hirth HM 508 [b] dargestellt, von denen der erstere den für 8 Zylinder-V-Motoren normalen Gabelwinkel von 90°, der letztere einen solchen von 60° aufweist. Die Welle des Argusmotors hat dementsprechend um 90° versetzte Zapfen und den durch den amerikanischen (adillac-Motor bekanntgewordenen vollständigen Ausgleich [31]. Die Welle des Hirth-Motors ähnelt einer Anordnung des

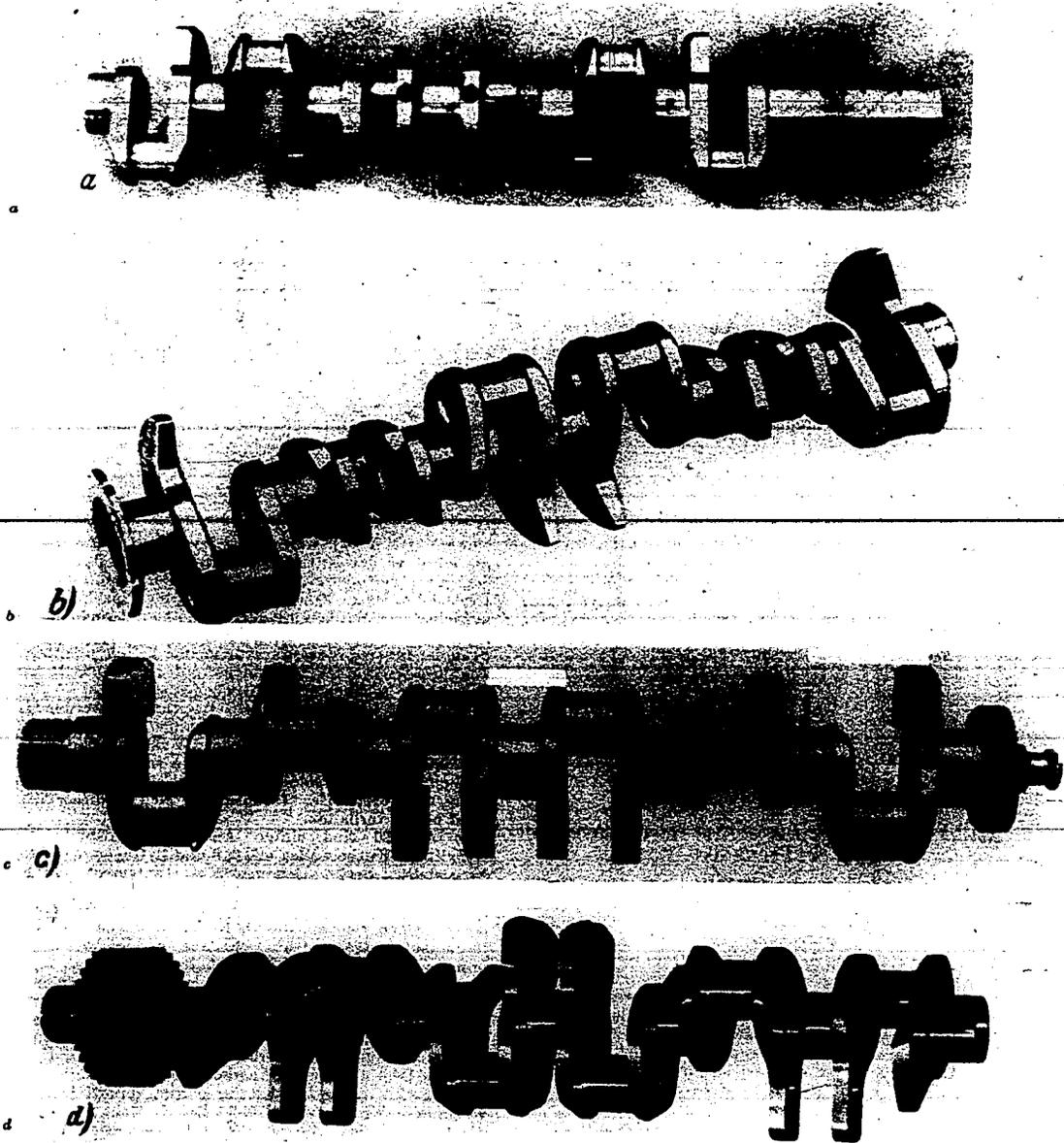


Abb. 20 Kurbelwellen von 12 Zylinder-V-Motoren mit verschiedener Anordnung der Gegengewichte

italienischen Lancia 8 Zylinder-Kraftwagenmotors, bei der die Kurbelzapfen entsprechend der Abweichung des Gabelwinkels versetzt sind.

4. Schmierstoff- und Kühlstoffführung

Die Kühlstoffführung im Motor innerhalb des Zylinderblocks wird im allgemeinen so ausgeführt, daß der Kühlstoff bei stehenden Motoren hinten an den Zylinder-

blöcken an tiefster Stelle zugeführt und vorn an höchster Stelle der Zylinderköpfe abgeführt wird. Bei hängenden Motoren erfolgt die Zuleitung entsprechend hinten an den Zylinderköpfen und die Ableitung vorn an der höchsten Stelle des Kühlraumes für die Laufbüchsen. Bei der Zuleitung ist darauf zu achten, daß der Durchtrittsquerschnitt für die gesamte Kühlstoffmenge am hintersten Zylinderkopf nicht zu stark gedrosselt wird; sonst muß die Zuleitung unterteilt werden. Außerdem dürfen

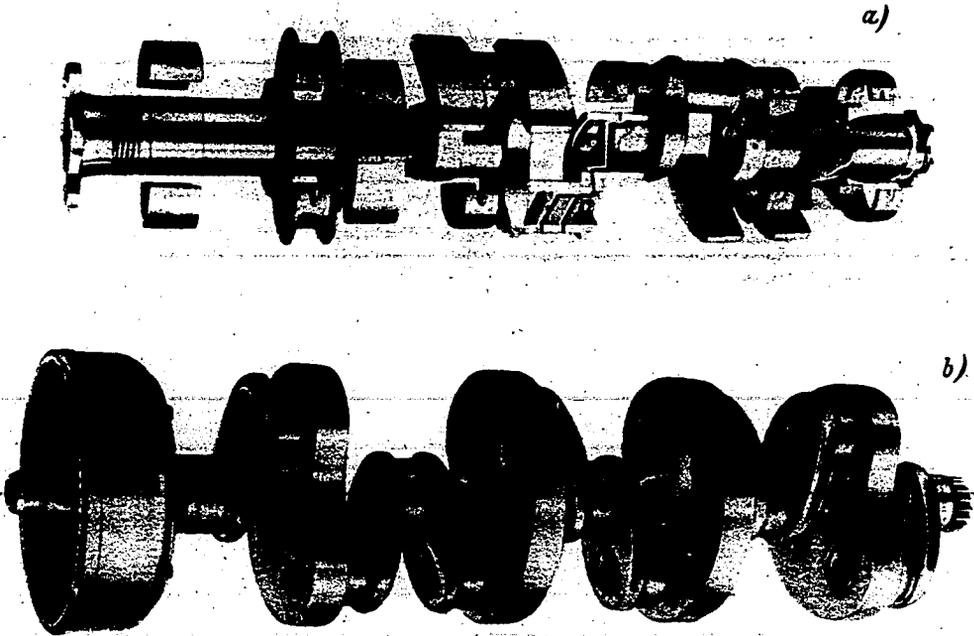


Abb. 21 Kurbelwellen von 8 Zylinder-V-Motoren

namentlich an den heißesten Stellen am Zylinderkopf, d. i. die Mitte des Zylinderbodens, und zwischen den Anlaßkanälen keine Wärmestauungen entstehen, auf deren Folgen schon hingewiesen wurde. Selbstverständlich ist auch bei der Konstruktion des Zylinderkopfes und der Ausbildung der Kerne darauf zu achten, daß keine toten Räume entstehen, an denen sich Dampfblasen bilden können. Eine hohe Umlaufgeschwindigkeit des Kühlstoffes ist immer das beste Mittel, einen guten Wärmeübergang zu erzielen und Dampfblasenbildung zu vermeiden. Die Kühlstoffumlaufgeschwindigkeit soll im allgemeinen 2 m/s nicht überschreiten.

Sollte trotz aller Maßnahmen, namentlich bei in der Leistung gesteigerten Motoren die normale Kühlstoffgeschwindigkeit nicht ausreichen, dann kann an den gefährdeten Stellen für eine bessere Wärmeabfuhr gesorgt werden, worauf schon hingewiesen wurde. Eine kräftige Bemessung der Kühlstoffpumpe ist zu empfehlen, da der Druck innerhalb des Kühlkreislaufes bis zu 3 ata betragen kann [32]. Die Wasserräume für die Laufbüchsen innerhalb des Zylinderblocks können eng gehalten werden. Im allgemeinen dürften 7 bis 8 mm genügen. Unnötige Erweiterungen, die nur den Kühlstoffinhalt des Motors vergrößern, sind zu vermeiden. Es darf ferner nicht vergessen werden, an höchster Stelle am Zylinderblock einen Entlüftungshahn vorzusehen, damit beim Auffüllen der Kühlkreislauf entlüftet werden kann. Ebenso ist an tiefster Stelle, am besten in der Höhe der Pumpe, eine Abbläverschraubung erforderlich. Da die Kühlstoffleitungen heute meistens aus biegsamen Schläuchen bestehen, ist die Gefahr des Undichtwerdens durch die Erschütterungen wesentlich vermindert. Wenn jedoch Rohre verwendet werden, dann müssen die Verbindungen durch Gummimuffen und Schlauchbinder her-

gestellt werden. Für das Abpressen der Zylinder auf Dichtigkeit hat sich ein Druck von 5 atü als ausreichend erwiesen.

Die Ölzufuhr zu den einzelnen Schmierstellen geschieht am zweckmäßigsten durch Bohrungen oder durch innerhalb des Gehäuses befestigte oder eingezogene Rohre. Eingegossene Rohre, die heute im Fahrzeugmotorenbau noch viel angetroffen werden, sind am besten zu vermeiden, da sie beim Eingießen innen verzundern. Der Zunder läßt sich schwer entfernen, löst sich später bei Erschütterungen und gelangt so in den Ölkreislauf. Lassen sich eingegossene Rohre nicht umgehen, dann sollen sie möglichst gerade ausgeführt werden, damit sie gut zu reinigen sind. Die betriebssicherste Lösung ist immer eine solche, bei der im Motor überhaupt keine Rohre erforderlich sind. Während Motoren mit stehenden Zylindern im allgemeinen nur zwei Ölabsaugstellen brauchen, im Gehäuseaumpf an der tiefsten Stelle und im vorderen Teil der Gehäusewanne, sind bei Hängemotoren verschiedene nötig. Das Öl muß vorn und hinten aus dem Kurbelgehäuse, aus dem Getriebe und aus den Zylinderhäuben vorn und hinten durch Rückförderpumpen abgesaugt werden. Es ist in diesem Falle zweckmäßig, alle Rückförderpumpen in einen gemeinsamen Sammelraum hinten am Kurbelgehäuse fördern zu lassen, von dem das Öl in den Behälter zurückgedrückt wird. Die Maßnahmen zur Ölentschäumung sind an anderer Stelle behandelt [33]. Am Gehäuse an tiefster Stelle ist ein Ölablaß vorzusehen. Außerdem ist dafür zu sorgen, daß sich bei stillstehendem Motor das Öl aus dem Behälter nicht durch die Pumpe ins Gehäuse entleeren kann. Die in der Druckleitung angeordneten Schmierstofffilter, meist Spaltfilter, sind so anzuordnen, daß sie auch bei eingebautem Motor leicht entfernt und

gereinigt werden können. Filter, bei denen der Schmutz durch eine besondere vom Oldruck betätigte Vorrichtung selbsttätig abgekratzt wird, sind vorzuziehen. Die Schlauchanschlüsse auf der Saugseite der Hauptölpumpe sind genügend weit zu halten. Eine Schmierstoffgeschwindigkeit von 0,5 bis 1 m/s im Zulauf sollte nicht überschritten werden, da sonst die Ansaugwiderstände bei kaltem Öl zu groß werden.

5. Steuerungs- und Geräteantrieb

Wie im Fahrzeugmotorenbau wird die Steuerung zusammen mit den Geräten meist am hinteren Ende der Kurbelwelle angetrieben, seltener an deren vorderem Ende. Letztere Anordnung ist zwar konstruktiv ungewisser, sie dürfte aber wegen der Nähe des Schwingungsknotens ruhiger laufen als beim Antrieb hinten am Schwingungsbau. Auf die ersten Antriebsräder, meist Stirnräder, wird das Drehmoment im allgemeinen durch eine drehteife Welle mit Keilprofil, die die Durchbiegungen des Kurbelwellenendes nicht mitmachen soll, übertragen. Dieser Antrieb, von dem bei Ottoeinspritz- und bei Dieselmotoren meist gleichzeitig die Einspritzpumpen mitbetrieben werden, muß unelastisch sein und darf insgesamt nur wenig Spiel haben, da sonst Steuer- und Einspritzzeiten ungenau werden. Die Übertragung etwaiger Drehschwüngen auf den Steuerungs- und Pumpenantrieb wird sich daher zwar nicht immer vermeiden lassen, aber durch das Zahnspiel können sich die Ausschläge nicht voll auswirken. Grundsätzlich ist anzustreben, mit möglichst wenig Zahnrädern auszu-

kommen, damit das Gesamtzahnspiel nicht zu groß wird, da jeder Zahneingriff mindestens 0,1 mm Spiel braucht. Ist das Gesamtzahnspiel zu groß, so läßt sich wegen schwankender Einspritzzeitpunkte bei Dieselmotoren nur schwer ein ruhiger Lauf des Motors erzielen.

Bei V-Motoren gibt es eigentlich nur zwei grundsätzliche verschiedene Anordnungen. Bei flüssigkeitsgekühlten Reihenmotoren werden die im Zylinderkopf gelagerten Nockenwellen wegen des großen Abstandes über Stirnräder und Kegelradwellen angetrieben, bei luftgekühlten Reihenmotoren mit im Kurbelgehäuse gelagerten Nockenwellen sind nur Stirnräder erforderlich. Der früher bei flüssigkeitsgekühlten Motoren übliche, zweifelslos einfachste Steuerungsantrieb durch eine einzige von der Kurbelwelle unmittelbar angetriebene Königs-welle für jede Zylinderreihe, läßt sich heute mit Rücksicht auf die vielen Hilfsgeräte nicht mehr durchführen und findet sich nur noch ganz vereinzelt (Hispano-Suiza, Coatalen).

Abb. 22 zeigt grundsätzliche Anordnungen des Steuerungsantriebs flüssigkeitsgekühlter Reihenmotoren, wobei in einem Fall eins, im anderen drei Zwischenräder die Kegelradwellen antreiben. Die Zwischenräder versorgen außerdem verschiedene Hilfsgeräte, Lader, Pumpen usw. Die immer ins Schnelle übersetzten Kegelradwellen laufen etwa mit 1,5- bis 2facher Kurbelwellendrehzahl. Selbstverständlich müssen die Wellen verdrehsteif ausgeführt werden, und die Anordnung des Antriebs muß ein leichtes Einstellen der Steuerung ermöglichen. Alle Antriebsräder sind aus Chrom-Molybdän-

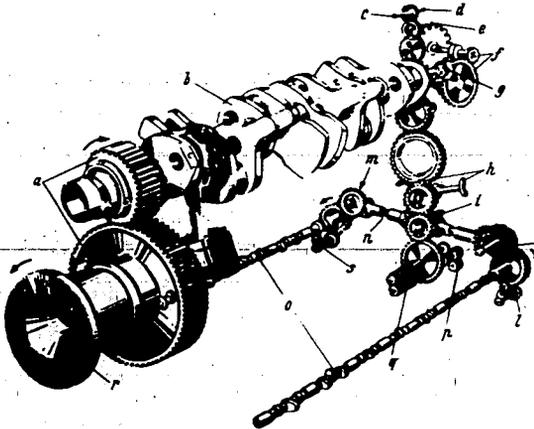


Abb. 22 Steuerungsantriebe von flüssigkeitsgekühlten 12 Zylinder-V-Motoren

- a = Übersetzungsgetrieberäder,
- b = Kurbelwelle 2700 U/min,
- c = Lichtmaschine 4900 U/min,
- d = Tachometer,
- e = Geber,
- f = Laderantrieb 28 350 U/min,
- g = Anlasserklaue,
- h = Magnetzünderantrieb 4050 U/min,
- i = Kühlmittelpumpenantrieb,
- k = Kraftstoffpumpe 2700 U/min,
- l = Rückölpumpen,
- m = Presserantrieb 5000 U/min,
- n = Steckwelle,
- o = Nockenwellen 1350 U/min,
- p = Frischölpumpe,
- q = Rückförderpumpen,
- r = Luftschraubenflansch 1540 U/min,
- s = Zylinderkopfhäube.

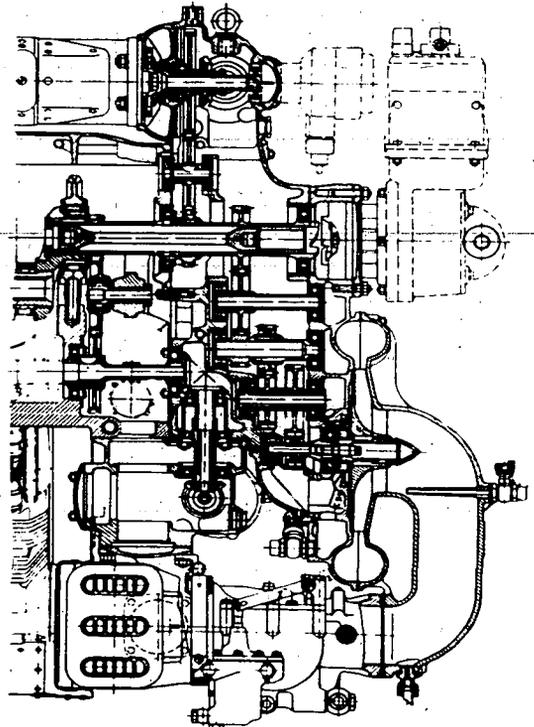


Abb. 23 Steuerungsantrieb eines luftgekühlten 12 Zylinder-V-Motors

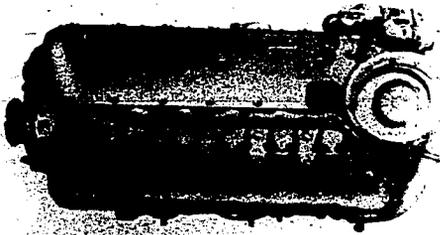
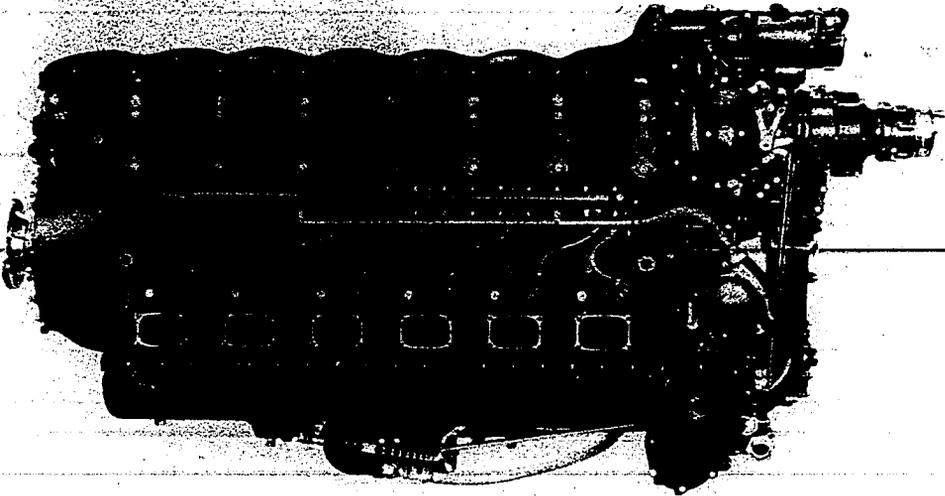


Abb. 24 Seitenansicht des Motors DB 600 (links) und Jumo 211 (unten), mit Motoraufhängeflanschen



Einsatzstahl (ECMo 100, ECMo 80, E 20 S) gehärtet herzustellen, Stirnräder mit Magg- oder Nilsschliff. Die geradflankig ausgeführten Kegelräder sollten ebenfalls geschliffen werden, da sich ein Verzug beim Härten kaum vermeiden läßt. Wenn sie jedoch, was oft der Fall ist, nicht geschliffen werden können, muß man sich mit Läppen begnügen. Kegelräder mit Spiralverzahnung (Gleasonräder) haben sich trotz ihrer Vorzüge aus Herstellungsgründen noch nicht eingeführt.

Luftgekühlte Reihenmotoren treiben ihre im Gehäuse gelagerten Steuerwellen im allgemeinen über ein einziges Zwischenrad an, wie das Beispiel Abb. 23 zeigt.

Auf den Antrieb der im Geräteträger zusammengefaßten Antriebe für Magnetzündler, Pumpen und die sonstigen Hilfsaggregate soll hier nicht eingegangen werden, da diese an anderer Stelle behandelt sind.

Der Anbau des Schwungkraft- oder Motordurchdrehanlassers (Bauart Hirth) sollte nach Möglichkeit so vorgenommen werden, daß er ohne Zwischenräder unmittelbar in ein mit dem hinteren Kurbelwellenende verbundenes Klauenstück eingreifen kann.

IV. Gesichtspunkte für den Einbau und die Triebwerkverkleidung

Bei der früher üblichen starren Aufhängung des Triebwerks mußte das Gehäuse das Schlußglied in dem Stabgerüst des Motorenbaus bilden und die vom Triebwerk herrührenden Kräfte übertragen. Durch die heute allgemeinbewährte Einschaltung elastischer Glieder, sei es in Form von Gummiklötzen oder federnder Stäbe, wird bekanntlich das Gehäuse erheblich von den Be-

anspruchungen entlastet und die Übertragung von Schwingungen, die vom Triebwerk erregt werden, auf die Zelle verhindert. Die Aufhängung bei V-Motoren wird heute im wesentlichen auf zwei Arten ausgeführt. Entweder sind je zwei bearbeitete Flächen etwa in Kurbelwellenmitte zu beiden Seiten des mittleren Grundlagers oder zwei Flansche hinten am Gehäuse tief und zwei vor der Motormitte hoch angeordnet, Abb. 24. Bei H- und X-Motoren kann die Aufhängung nur in der Längsachse angebracht werden, wobei sie bei in der Mitte geteilten Gehäusen auf der Trennfuge liegen muß. Kleinere Reihenmotoren werden überwiegend in je zwei

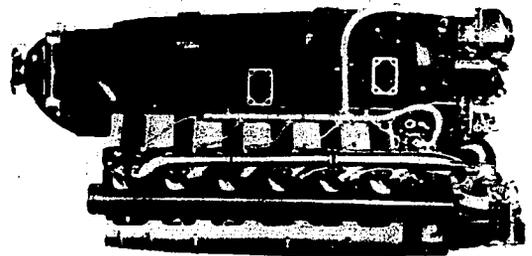


Abb. 25 Seitenansicht des Motors Hirth HM 512 mit Motoraufhängeflanschen

Abb. 26 Seitenansicht des Motors
Rolls-Royce Merlin
mit Motoraufhängepratzen

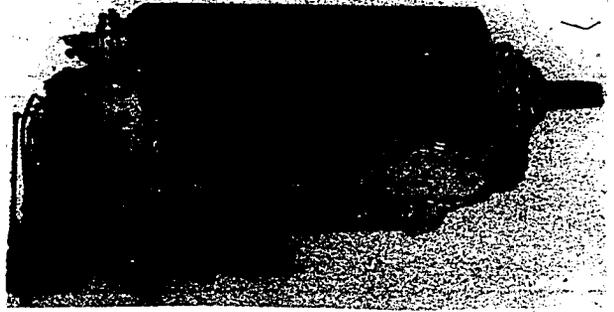


Abb. 27 a Vorderansicht des Motors Rolls-Royce Merlin

Punkten vorn und hinten etwa in Kurbelwellenmitte befestigt, seltener in verschiedener Höhe hinten und in Motormitte, Abb. 25. Die Aufhängepunkte selbst werden nur noch selten als angegossene Pratzen ausgeführt, wie bei Rolls-Royce, Abb. 26, sondern fast ausschließlich als bearbeitete Flächen; mitunter werden auch eingezogene Rohre verwendet. Die meist mit vier Schrauben versehenen Anschlußflächen, an denen die Tragzapfen befestigt werden, müssen so angebracht werden, daß sie in mindestens eine oder besser zwei Querwände übergehen, damit eine sichere Überleitung der Kräfte ins Gehäuse gewährleistet ist. Falls möglich, können einige

der zur Querverspannung des Gehäuses dienenden Zuganker zur Befestigung der Tragpratzen oder -zapfen herangezogen werden. Ferner ist es zweckmäßig, zur Aufnahme der Anschlußglieder eine Zentrierung vorzusehen, die nach Bedarf mit einer Stahlbüchse ausgefüllt wird.

Für den Triebwerkeinbau, dessen Entwurf Sache des Zellenbaus ist, sei zunächst auf die bekannte Forderung hingewiesen, daß die Verkleidung möglichst knapp um den Motor herumgelegt werden kann. Aus diesem Grunde muß bei der Gesamtkonstruktion darauf geachtet werden, daß sich im Querschnitt eine gute Linienführung



Abb. 27 b Vorderansicht des Motors Jumo 211

ergibt. Seitlich am Motor dürfen demnach keine ausladenden Teile vorhanden sein. Da die Motorverkleidung von vorn nach hinten in einer schwach ansteigenden Linie verläuft, können, wenn es sich nicht vermeiden läßt, am Geräteträger einige Teile, z. B. Lichtmaschinen, über den Motorquerschnitt etwas hinausragen. Die bei V-Motoren am weitesten nach außen stehenden Teile, z. B. die Zylinderhauben, sind, wie Abb. 27 a und Abb. 27 b zeigen, so abzuschrägen, damit für die Verkleidung eine gute ovale Form gewählt werden kann. Am Motor selbst sind Augen für die Befestigung des Haubengerüsts anzubringen, deren Lage im einzelnen mit dem Flugzeugwerk, das den Motor einbaut, festzulegen ist. Diese Augen sind sowohl vorn am Getriebedeckel als auch seitlich am Gehäuse notwendig.

Die Gehäuseentlüftungstutzen münden meist innerhalb der Motorverkleidung. Es ist jedoch zu empfehlen, die Dämpfe an geeigneten Stellen nach außen zu führen. Die Führung des Ansaugchachtes aus der Motorverkleidung heraus richtet sich nach der Laderanordnung und erfordert meist eine Hutze seitlich oder unten an der Verkleidung, die zwar einen zusätzlichen Widerstand bedingt, aber wegen der Ausnutzung des Staudrucks zur Aufladung, die bekanntlich einen Gewinn an Höhenleistung ergibt, meist nicht zu vermeiden ist.

V. Konstruktive Lösungen bei den heute üblichen Bauformen

1. 12 Zylinder-Reihenmotor

Einige wesentliche konstruktive Merkmale flüssigkeitsgekühlter 12 Zylinder-Reihenmotoren sind in Zahlentafel 5 zusammengestellt.

Luftgekühlte 12 Zylinder-Reihenmotoren mit ihren einzeln stehenden Zylindern weichen in ihrem Aufbau grundsätzlich nicht sehr voneinander ab. Bemerkenswert ist bei dem Hirthmotor 512 der Aufbau des Kurbelgehäuses mit durchgehenden Querwänden, der durch die im Gehäuse zusammengebaute Hirthwelle ermöglicht wird. Die schmalen Rollenlager müssen außerdem grundsätzlich kleinere Zylinderabstände und somit eine kürzere Baulänge ergeben, sofern diese nicht durch die Ver-

Zahlentafel 5. Konstruktive Merkmale flüssigkeitsgekühlter 12 Zylinder-V-Motoren

Baumuster	Bauform	Konstruktive Merkmale
Rolls Royce-Merlin Allison	Laufbüchsen: naß zwischen Zylinderkopf und Gehäuse eingespannt. Zylinderblock: Zylinderkopf und Kühlmantel bei Rolls Royce ein Gußstück, bei Allison 2 Teile verschraubt. Bei beiden Mustern auf Gehäuse mit Zugankern befestigt. Gleitlagerpleuel.	Freie Dehnung des Kühlmantels nach innen; Aufbau nicht sehr starr; Herstellung stellt hohe Anforderungen an Werkstoffgenauigkeit. Leichter Abbau der Zylinderblöcke.
Junkers Jumo 210 und 211	Laufbüchsen: naß, einstellbar gegen Zylinderkopf dichtend angezogen.	Freie Dehnung des Gehäuses gegen die Laufbüchsen. Aufbau des Gehäuses erleichtert Längsdehnung; Einzelverspannung der Laufbüchsen gegen Zylinderkopf erleichtert Fertigung. Ausbau der Kolben samt Pleuel durch Laufbüchse nach Abnahme des Gehäusedeckels und Lösen der Pleuischrauben.
Hispano-Suiza	Laufbüchsen: naß, im Zylinderblock oben eingeschraubt und eingeschrumpft; Zylinderkopf und Kühlmantel ein Gußstück; Abdichtung durch Stopfbüchse gegen Gehäuse. Zylinderblock mit Flansch und Stiftschrauben auf Gehäuse befestigt. Gehäuse in Mitte geteilt und verhältnismäßig niedrig. Gleitlagerpleuel.	Freie Dehnung des Zylinderblocks nach außen; Konstruktion ergibt zwar äußerlich glatte Bauform, die aber infolge des niedrigen Gehäuses wenig starr ist. Leichter Abbau der Zylinderblöcke.
Daimler-Benz	Laufbüchsen: trocken, im Zylinderblock eingeschrumpft und unten eingeschraubt; Zylinderkopf und Kühlmantel ein Gußstück; Befestigung des Zylinderblocks auf dem Gehäuse durch auf die Laufbüchsen geschraubte Ringmuttern. Rollenlagerpleuel.	Freie Dehnung des Zylinderblocks nach außen; außen glatte Bauform. Verbindung des hohen Gehäuses mit Zylinderblock durch Ringmuttern gibt sehr starren Aufbau, der Wärmeexpansionen nicht hindert. Abbau des Zylinderblocks erfordert Abnahme des Gehäusedeckels.

rippung der Zylinderköpfe bestimmt wird. Die Hirthwelle gestattet ferner schmale ungeteilte, rollengelagerte Pleuelstangen von zwei Zylindern nebeneinander auf dem Hubzapfen zu verwenden, dadurch werden allerdings unter Inkaufnahme einer unwesentlichen Versetzung der Zylinderreihen die Pleuel für alle Zylinder gleich. Diese Vorteile dürften den Aufwand der sicher etwas schwereren und komplizierteren Hirthwelle aufwiegen, deren Fertigung so fortgeschritten ist, daß die Einzelteile austauschbar sind. Bei Flugmotoren mit Gleitlagern

ist diese im Fahrzeugmotorenbau oft verwendete Bauart deswegen nicht zu empfehlen, weil bei den breiteren nebeneinander liegenden Gleitlagerpleueln die Versetzung der Zylinderreihen zu groß wird und durch die erforderliche Abkröpfung der Gehäusequerwände zusätzliche Biegebeanspruchungen unvermeidbar sind. Andere luftgekühlte 12 Zylinder-Reihenmotoren wie Argus 410 und De Havilland Gipsy 12, haben daher Gabelpleuelstangen. Konstruktive Unterschiede finden sich bei den erwähnten drei Motoren noch in der Anordnung der Steuerung. Hirth kommt mit einer innerhalb des Zylinder-V liegenden Steuerwelle aus, während die anderen beiden Motoren zwei außen im Gehäuse gelagerte Steuerwellen mit gleichfalls außen angeordneten Stoßstangen verwenden. Dem gewichtlichen Vorteil der einzigen Steuerwelle bei Hirth dürfte der Nachteil der etwas weniger gut zugänglichen innen liegenden Stoßstangen gegenüberstehen. Schließlich sei noch auf die verschiedenen konstruktiven Lösungen der Zylinderkonstruktion hingewiesen. Hirth und De Havilland verwenden die bei kleineren luftgekühlten Reihenmotoren gebräuchlichen abnehmbaren Zylinderköpfe, die durch je vier im Gehäuse verschraubte Zuganker gegen die Laufbüchsen unter Zwischenschaltung einer Kupferdichtung gespannt werden. Die Laufbüchsen von Hirth bestehen aus Grauguß. Argus hat die bei Sternmotoren bewährte Bauart mit auf die Stahllaufbüchsen aufgeschraubten Zylinderköpfen gewählt, die eine freiere Dehnung der Zylinder gestatten.

2. 24 Zylinder-Reihenmotoren

Der bekannte in seinem ganzen Aufbau recht verwickelte 24 Zylinder-H-Motor Napier-Dagger kann konstruktiv nicht als vorbildliche Lösung angesehen werden. Trotz seiner kleinen Zylinder von nur 0,71 Inhalt erreicht er das hohe Hubraumgewicht von 37 kg/l und bei einer Raumleistung von 60 PS/l ein Leistungsgewicht von 0,62 kg/PS. Dieses Leistungsgewicht dürfte den Aufwand von 24 Zylindern für einen Reihenmotor von 1000 PS, dessen Herstellungspreis entsprechend hoch ist, nicht rechtfertigen. Mit den Zylindern von 0,71 Inhalt ist der Bestwert der Zylindergröße offenbar bereits unterschritten. Das Kurbelgehäuse wird durch die eingegossenen Ladeleitungen zwar hoch und biegungesteif, aber auch entsprechend schwer.—Die Einzelteile, besonders die Zylinder, sind nicht gut zugänglich. Im Gegensatz zu den luftgekühlten 12 Zylindermotoren ist die Steuerung in einem durchgehenden Gehäuse auf den Zylinderköpfen angeordnet, eine Ausführung, über deren Bewährung im Hinblick auf die ungleiche Wärmedehnung der Zylinder keine Erfahrungen vorliegen.

Bei dem in H-Form ausgeführten 24 Zylinder-Hispano-Suiza-Großtriebwerk von 2600 PS Abflugleistung bei 72 l Inhalt arbeiten beide Kurbelwellen, die sich gleichsinnig drehen müssen, über ein Stirnradgetriebe auf die Luftschraubenwelle, Abb. 28. Da ein solcher Motor nur für mehrmotorige Flugzeuge und Einbau im Flügel in Frage kommt, ist das Getriebe und die Luftschraubenwelle sehr weit nach vorn gezogen, um genügend Abstand der Luftschraube von der Flügelvorderkante zu gewinnen. Diese Ausführung findet man neuerdings auch bei Doppelsterntmotoren (Twin Wasp).

Beispiele für 24 Zylinder-Doppeltriebwerke von über 2000 PS Abflugleistung sind der DB 606 und der Allison-Motor, Abb. 29 und 30. Bei beiden Motoren arbeiten zwei voneinander unabhängige 12 Zylinder-V-Motoren über ein Stirnradgetriebe auf die Luftschraube. Während beim Allison-Motor die Mittelebenen beider in einem gemeinsamen Gehäuse stehend angeordneten Motoren einen Winkel von 90° bilden, ist dieser Winkel bei dem hängenden zweigehäusigen Doppelaggregat DB 606 spitz, wodurch die Baubreite kleiner, die Bauhöhe größer wird. Da solche Triebwerke hauptsächlich für den Einbau im Flügel bestimmt sind, ist im Einzelfall zu unter-

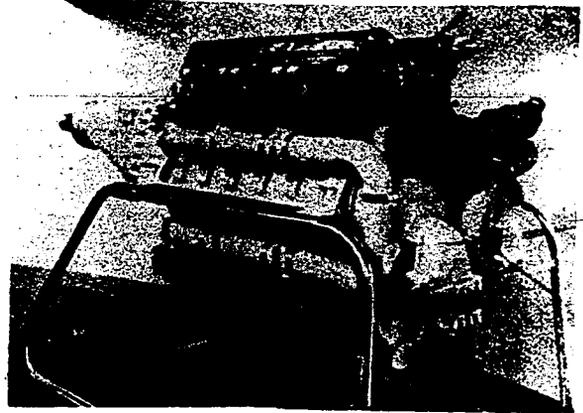


Abb. 28 24 Zylinder-H-Motor von Hispano-Suiza

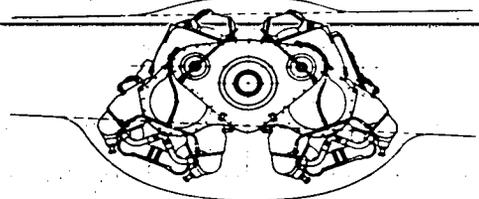


Abb. 29 24 Zylinder-Doppelmotor DB 606

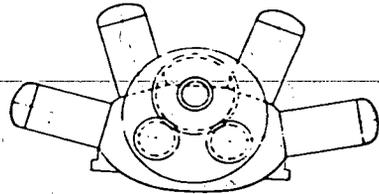


Abb. 30 24 Zylinder-Doppelmotor Allison

suchen, welche Ausführung günstiger ist. Die einzelnen Motoren arbeiten im gleichen Drehinn. Zur Wahrung der Unabhängigkeit der Einzelmotoren bei einer Störung müssen die Kupplungen entweder als Freilaufkupplungen oder als selbsttätig ausrückbare Klauenkupplungen ausgebildet sein. Bei einer Freilaufkupplung, wie sie beispielsweise bei dem luftgekühlten 12 Zylinder-Menasco-Doppelmotor „Unitwin“ ausgeführt ist, müßte dem bei solchen Kupplungen bekannten Verschleiß Rechnung getragen werden: Klauenkupplungen benötigen zum Schalten einer Synchronisierereinrichtung. Bezüglich der Wirkungsweise und der Schalmöglichkeiten des Getriebes vom DB 606 sei auf den Bericht von Friedrich verwiesen [2].

Bei den genannten Großtriebwerken arbeiten zwei Motoren nebeneinander — auch H-Motoren können so aufgefaßt werden — auf eine Schraube, eine Anordnung, die im Schiffbau üblich ist und die auch bei einigen Großflugzeugen des Weltkrieges angewendet wurde. Das Hintereinanderschalten von zwei Motoren, wie es bei dem Fiat-Rennmotor As 6 mit gegenläufigen

Schrauben ein einziges Mal angewendet wurde, hat durch die große Baulänge die bekannten Einbauschwierigkeiten zur Folge. Dagegen wird das Doppeltriebwerk heutiger Bauart für gegenläufige Schrauben besonders geeignet sein, sobald diese für die allgemeine Einführung hinreichend erprobt sind.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden einige wesentliche konstruktive Gesichtspunkte behandelt, die nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse beim Entwurf von Reihenflugmotoren zu berücksichtigen sind. Dabei wurde insbesondere dem konstruktiven Aufbau der flüssigkeitsgekühlten 12 Zylindermotoren, denen heute eine große Bedeutung zukommt, Rechnung getragen. Obgleich die Abflugleistungen dieser bewährten Bauart bereits 2000 PS erreicht haben und auch weitere Steigerungen der Dauerleistung zu erwarten sind, ist man doch allenthalben bemüht, Motoren mit größeren Zylinderzahlen zu entwickeln, um Leistungen über 8000 PS zu verwirklichen. Deshalb wurden die Möglichkeiten der Zylinderanordnung unter Berücksichtigung der Einbauverhältnisse betrachtet und die Fragen der 24 Zylindermotoren, die jetzt in der Praxis immer mehr zur Einführung kommen, soweit Unterlagen dafür zur Verfügung standen, erörtert. Diese Weiterentwicklung, die gleichzeitig mit der Erhöhung der Schnellläufigkeit und der mittleren Nutzdrehmomente bei stärkerer Überladung vermehrte mechanische und thermische Beanspruchungen zur Folge hat, muß sich auf den konstruktiven Aufbau der Motoren auswirken. Um diesen Belastungen gewachsen zu sein, müssen Gehäuse, Zylinder und Kurbeltrieb sorgfältig durchgebildet werden. In diesem Sinne wurden Überlegungen über den Einfluß der Konstruktion auf das Baugewicht, das Betriebsverhalten und die Fertigung an Hand von Beispielen angestellt. Die Kühlstoff- und Schmierstoffführung sowie die Gesichtspunkte für den Einbau und die Triebwerkverkleidung werden nur so weit behandelt, als die Gestaltung des Motors unmittelbar betroffen wird. Schließlich werden Hinweise auf konstruktive Erfahrungen durch eine kurze vergleichende Betrachtung einiger bewährter Ausführungen gegeben. Das es nicht möglich ist, für die immer verschiedenen gestellten Entwurfsaufgaben Bestlösungen zu empfehlen, ist der Zweck der Ausführungen erfüllt, wenn sie dem Konstrukteur einige Anregungen bei seiner Arbeit geben können.

Schrifttum

- [1] E. Heinkel, Die Erhöhung der Fluggeschwindigkeit in den letzten Jahren. Vortrag, gehalten auf der Hauptversammlung der Lilienthal-Gesellschaft f. Luftfahrtforschung, Berlin, 12. 10. 38; Jahrbuch 1938 der Deutschen Luftfahrtforschung, Ergänzungsband S. 1.
- [2] A. Friedrich, Verbindung bekannter Grundmuster zu Gruppenmotoren höherer Leistungsklassen. Lilienthal-Ges. f. Luftfahrtforschung, Bericht 100, Flugwerk und Triebwerk S. 71.
- [3] G. Bock, Wege zur Leistungssteigerung im Flugzeugbau. Luftwissen Bd. 4 (1937) Nr. 4 S. 108.
- [4] W. Bensinger und H. Denkmeier, Einfluß der Zylinderzahl auf das Baugewicht von Flugmotoren. Ringbuch der Luftfahrttechnik III A 4 S. 19—20.
- [5] P. Rieckert und A. Held, Leistung und Wärmeabfuhr bei geometrisch ähnlichen Zylindern. Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Ausgabe Triebwerk, S. 80—82.

- [6] A. H. R. Fedden, Trend of Aircooled Aero Engines — The Next Five Years; S. A. E.-Journal Bd. 41 (1937) Nr. 4 S. 444.
- [7] G. I. Mead, Aircraft Powerplant Trends. SAE Journal Bd. 41 (1937) Nr. 4 S. 465.
- [8] O. Kurtz, Forschungsaufgaben und Gestaltungsfragen bei Steigerung der Triebwerkleistung. Luftwissen Bd. 4 (1937) Nr. 4 S. 117.
- [9] P. Kappus, Vergleich der Zylinderanordnung bei Flugmotoren in H- und X-Form. Ringbuch der Luftfahrttechnik III A 7 S. 9.
- [10] I. Gasterstädt, Vom Junkers-Flugdieselmotor. Luftwissen Bd. 3 (1936) Nr. 10 S. 318.
- [11] H. Hertel, Aufteilung oder Konzentration bei Triebwerken mittlerer Größe. Lilienthal-Ges. f. Luftfahrtforschung, Bericht 100, Flugwerk und Triebwerk, S. 65, 66.
- [12] E. Vohrer, Neuzeitliche Flugmotoren/Bauformen; Betriebskennwerte. ATZ Bd. 43 (1940) Heft 7 S. 169—170.
- [13] W. Bensinger, Studien der DVL über die Vergrößerung der Motorenquerschnitte. Lilienthal-Ges. f. Luftfahrtforschung, Bericht 100, Flugwerk und Triebwerk, S. 77.
- [14] W. Bensinger, Einfluß der Zylindergröße auf das Baugewicht von Flugmotoren. Luftfahrtforschung Bd. 14 (1937) Lfg. 4/3, S. 229.
- [15] F. Jaklitsch, Der Weg zum Großflugmotor. ATZ Bd. 42 (1939) Heft 22 S. 586.
- [16] W. Bensinger, Untersuchung über die günstigste Zylinderzahl und Zylindergröße von Flugmotoren im Hinblick auf Leistung, Drehzahl, therm. Belastung und Gewicht. 1. Teilbericht. Einfluß des Hubverhältnisses auf Leistung, Triebwerkteile und Leistungsgewicht. ZWB FB 537/1.
- [17] W. Bensinger, s. oben, 2. Teilbericht, Einfluß des Schubstangenverhältnisses auf Triebwerkbeanspruchungen, Ungleichförmigkeitsgrad, freie Massenkräfte und Leistungsgewicht. ZWB FB 537/2.
- [18] F. Jaklitsch, Entwicklung und Bemessung der Hochleistungsmotoren, insbesondere der Flugmotoren. ATZ Bd. 42 (1939) Nr. 10 S. 275.
- [19] K. Lürenbaum, Schwingungen des Systems Kurbelwelle-Luftschaube. Jahrbuch 1937 der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt e. V. S. 486—489.
- [20] K. Lürenbaum, Einfluß von Formgebung und Werkstoff auf die Gestaltfestigkeit geschmiedeter und gegossener Flugmotorenkurbelwellen. Jahrbuch 1937 der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt e. V. S. 490—493.
- [21] Interavia Nr. 666 vom 8. 8. 1939.
- [22] F. W. Achterberg, Entwicklung und Herstellung des Schweröflugmotors. Luftwissen Bd. 6 (1939) Nr. 6 S. 193—194.
- [23] M. Christian, Einige Entwicklungsfragen des Flugmotorenbaus. ATZ Bd. 41 (1938) Nr. 6 S. 156.
- [24] A. Berger, Die Entwicklung der Vorkammer-Viertakt-Dieselmotoren als Luftschiff-, Schnellboots- und Flugmotoren. Gesammelte Vorträge der Hauptversammlung 1937 d. Lilienthal-Ges. f. Luftfahrtforschung S. 280—281.

- [25] I. Zeyns, Gestaltungsgrundlagen für Ventile im Flugmotor. Ringbuch der Luftfahrttechnik III A 1 S. 9—10.
- [26] F. R. Banks, Valve and Valve Seat Technique for Automobile and Aero Engines. The J. A. E. December Journal 1938 S. 54 ff.
- [27] M. Christian, Ausbildung von Kurbelgehäusen und des Hilfsapparateils für kleine luftgekühlte Reihenmotoren. Ringbuch der Luftfahrttechnik III A 17.
- [28] W. Behrmann, Drehschwingungssystem mit federndem Umlauftrieb. Deutsche Luftfahrtforschung FB Nr. 788.
- [29] Double Propeller Drive. Automative Industries (1939) Sept. S. 279.
- [30] F. Nallinger, Einfluß moderner Flugmotorenkonstruktionen in Reihenbauart auf die Lagerausbildung. Luftwissen Bd. 3 (1936) Nr. 10 S. 302.
- [31] E. W. Seaholm, Die Balancierung der Cadillac V-63-Maschine. Motorwagen (1924) S. 148—151.
- [32] A. Scheibe, Kühleinrichtungen am flüssigkeitsgekühlten Flugmotor. Ringbuch der Luftfahrttechnik III A 11.
- [33] A. Berger, Die Schmierung von Flugmotoren. Ringbuch der Luftfahrttechnik III A 20.

Abgeschlossen am 15. Mai 1940

9868