

Beitrag zur Entwicklung starker Motoreinheiten

Von Wunibald Kammer

Der Kerosinmotor stellt in die Luftbewandlung und Beförderungsbauart der Flugzeuge wachsende Forderungen. Zu ihrer Erfüllung ist eine wesentliche Erhöhung der Vortriebsleistung notwendig. Neben dem Kolbentriebwerk hat in letzter Zeit das Strahltriebwerk die Aufmerksamkeit der zuständigen Kreise stark auf sich gezogen. Der Anwendungsbereich des Strahltriebwerks wird müssen auch nach Erreichen völliger Betriebsreife begrenzt sein. Das selbe gilt für die noch in Scholle der Zukunft liegenden Pläne für Verbrennungsturbinen- oder Dampftriebwerke. Der vorhandene ausgereifte Kolbenmotor wird zunächst nach wie vor der Hauptträger des Einsatzes und der Entwicklung bleiben. Seine Ausschöpfung bis an die ihm wirklich gezogenen, heute aber noch nicht abschabaren Grenzen ist eine Rüstungsnotwendigkeit. Die Pflege seiner Entwicklung erfordert deshalb unseren unverminderten Einsatz.

Wie einige Arbeiten der Akademie und Veröffentlichungen der letzten Zeit zeigen [1, 2], ist sich die Fachwelt sowohl über das Bedürfnis der Schaffung starker Flugmotoren, als auch über die wesentlichen Grundlagen ihrer Ausbildung völlig einig. Aus der Vielzahl der Möglichkeiten haben sich einige wenige Bauweisen herausgeschält, die nach den vorliegenden Erfahrungen den gestellten Anforderungen am besten zu genügen versprechen. Allerdings sind in diesen Veröffentlichungen nicht alle Gesichtspunkte, die für die Entscheidung von Bedeutung sind, gebührend berücksichtigt. Der Zweck der nachfolgenden Ausführungen soll es sein, den Stand der Erkenntnisse und Erfahrungen auf diesem Gebiet möglichst umfassend unter Herausschälung der wichtigsten Gesetzmäßigkeiten so darzulegen, daß klare Überlegung in diesen Unterlagen den Weg zur zweckmäßigen praktischen Gestaltung zu finden vermag. Es ist zu hoffen, daß die Ausführungen dazu beitragen werden, die Arbeiten an der Schaffung und dem Einsatz des starken Flugtriebwerks zu beschleunigen.

1. Grundsätzliche Möglichkeiten der Leistungssteigerung

Nach der allgemeinen Leistungsgleichung ist bei Zweit- und Viertaktmotoren eine Steigerung der Motorleistung auf folgenden Wegen möglich:

1. durch Erhöhen der mittleren Kolbengeschwindigkeit;
2. durch Steigerung des mittleren nützlichen Kolbendrucks;
3. durch Vergrößern der Gesamtkolbenfläche.

Die weiteren einzelnen Untersuchungen seien auf das Viertaktverfahren beschränkt.

Einer Steigerung der mittleren Kolbengeschwindigkeit stehen entgegen die Verminderung des Ladegrades infolge der zunehmenden Strömungsverluste, die durch Einführung von Schiebersteuerungen noch um ein gewisses Maß abzumildern ist, das Anwachsen der Lagerkräfte durch die stark vermehrten Massenkräfte, die Verminderung der Nutzleistung wegen der ansteigenden Reibungsleistung und damit in Zusammenhang die Verschlechterung der Kraftstoffausnutzung infolge des abnehmenden mechanischen Wirkungsgrads. Eine mittlere Kolbengeschwindigkeit von 14 m/s kann heute, als sicher erreichbar angesehen werden; in absehbarer Zeit dürfte es möglich sein, diesen Wert auf etwa 16 bis 18 m/s zu erhöhen.

Der mittlere Nutzdruck läßt sich steigern vor allem durch Vermehren des Füllungsgewichts mittels Überladung, die bei geeigneter Ventilüberschneidung gleichzeitig ein Ausspülen der Restgase bewirkt, in geringerem Maße auch durch Erhöhung des Verdichtungsgrads, d. h. durch Verbesserung der thermischen Ausnützung. Eine Grenze ist aber durch die Klopfestigkeit des Kraftstoffs und die thermische Belastung des Motors gezogen. Diese Grenze ist von den Zylinderabmessungen abhängig. Bei Verkleinern der Zylinderabmessungen werden die Flammen- und die Wärmeleitwege kürzer, wodurch infolge des günstigeren Klopfverhaltens eine Steigerung der mittleren Innendrucke möglich ist [3]. In Abbildung 1 sind nach Versuchen des Forschungsinstituts für Flugmotoren Stuttgart [4] die Verhältniszerte der mittleren Innendrucke über dem Zylinderhubraum aufgetragen. Man erkennt, daß die Zylindergröße dann keinen Einfluß auf den mittleren Innendruck ausübt, wenn Verdichtung und Ladedruck unverändert gehalten werden (Linie 1). Wird die Verdichtung festgehalten und der Ladedruck bis zur Erreichung der Klopfgrenze erhöht, so ergibt der kleinere Zylinder wesentlich höhere

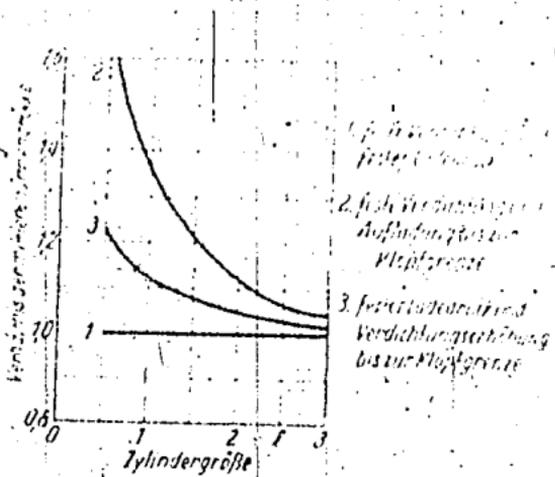


Abb. 1
Verhältnis der mittleren Innendrucke abhängig von der Zylindergröße

mittlere Innendrucke als der große (Linie 2). Bei festgehaltenem Ladedruck und Steigerung der Verdichtung bis zur Klopfgrenze verläuft die Kurve (3) zwischen den Linien 1 und 2. Die Ursache für die geringere Wirkung der Verdichtungssteigerung liegt darin, daß der Brennraum bei Verdichtungssteigerung immer ungünstigere Formen annimmt.

Die Möglichkeiten der Leistungssteigerung sind demnach bei Überladung und kleinen Zylindern besonders groß. Dabei ist aber zu beachten, daß eine wirtschaftliche Ausnützung mit mechanisch angetriebenem Lader wegen der erforderlichen Laderantriebsleistung und einer gegebenenfalls notwendigen Ladeluftkühlung nicht in vollem Umfang möglich ist. Dazu kommt weiter, daß einer beliebigen Verkleinerung der Zylindergröße durch die bei gleicher mittlerer Kolbengeschwindigkeit ansteigenden Drehzahlen und die dadurch bedingten erhöhten mechanischen Verluste im Gesamttriebwerk insofern Grenzen gezogen sein können, als der mittlere Nutzdruck selbst bei erhöhtem mittlerem Innendruck abzufallen beginnt. Bei Berücksichtigung dieser Zusammenhänge ergeben sich nach Berechnungen, die etwa auf dem jetzigen Stand der Entwicklung beruhen¹⁾, die in Abbildung 2 über der Zylindergröße

¹⁾ Höhere Werte von Mitteldruck und Kolbengeschwindigkeit erscheinen nach geuerdings vorliegenden Versuchsergebnissen bald erreichbar. Doch soll hier der augenblickliche Stand zugrunde gelegt werden. Die zu erwartende Erhöhung der Werte verschiebt nur in günstiger Weise die Gesamtleistungen, ändert aber nichts an dem Ergebnis der vorliegenden Vergleichsbetrachtungen.

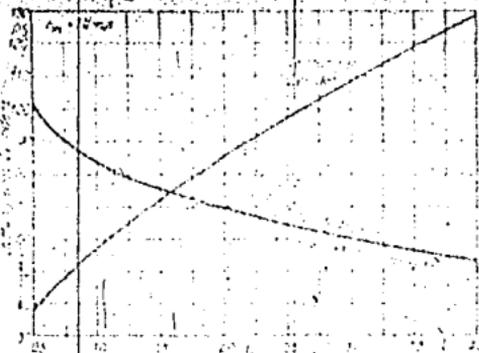


Abb. 2

Mittlerer Nutzdruck, Kolbenflächenleistung und Einzylinderleistung für gleichbleibenden Ladedruck und Verdichtung bis zur Klopfgrenze

aufgetragenen mittleren Nutzdrücke, und zwar bei festgehaltenem Ladedruck von 1,2 ata und Verdichtung bis zur Klopfgrenze sowie die hieraus folgenden Einzylinderleistungen. Danach betragen die heute sicher beherrschbaren mittleren Nutzdrücke 12,5 bis 15 kg/cm², je nach der Zylindergröße.

Nun sei die Bemessung eines Motors für eine bestimmte Leistung erörtert. Nach der allgemeinen Leistungsgleichung ist die auf die Einheit der gesamten Kolbenfläche bezogene Nutzleistung, die Kolbenflächenleistung, dem Produkt aus mittlerer Kolbengeschwindigkeit c_m und mittlerem Nutzdruck p_{me} verhältig. Mit den schon genannten Werten $c_m = 14$ m/s und $p_{me} = 12,5$ bis 15 kg/cm² ergibt sich für die Kolbenflächenleistung ein Wert von 0,6 PS/cm² für die größeren und von 0,7 PS/cm² für die kleineren Zylinder (Abbildung 2). Diese Werte sind heute bereits teilweise überschritten. In absehbarer Zeit dürfte eine Steigerung auf 0,9 PS/cm² möglich sein.

Rechnet man zunächst für alle Zylindergrößen mit einem Mittelwert von 0,65 PS/cm², wobei auf die höhere Belastbarkeit des kleineren Zylinders keine Rücksicht genommen ist, so ergibt sich für eine verlangte Nutzleistung eine bestimmte Gesamtkolbenfläche. Diese kann nun auf wenige Zylinder mit großem Durchmesser oder auf viele Zylinder mit kleinem Durchmesser verteilt werden. Verwendet man außerdem bei allen Zylindergrößen gleiches Verhältnis Hub/Bohrung, d. h. baut man die Zylinder geometrisch ähnlich, so ist ohne weiteres ersichtlich,

daß bei der gleichen Gesamtkolbenfläche, der erforderliche Gesamthubraum mit dem kleineren Hub die Zylinder von kleinerem Durchmesser ebenfalls klein wird. Bemerkenswert ist ferner, daß aus diesem Grund auch für die Leistungsausnutzung der Hubräume ein möglichst kleines Verhältnis Hub/Bohrung günstig ist. Die mit Verkleinerung des Hubs bei gleichbleibender Kolbengeschwindigkeit zunehmende Drehzahl, die daraus folgenden höheren Massenkräfte und Lagerbelastungen bilden aber eine Grenze.

Setzt man nunmehr der Betrachtung den höheren Mitteldruck des kleineren Zylinders gemäß Abbildung 2 zugrunde, so wird die Ausnutzung des Gesamthubraums noch günstiger, und man erhält die in Abbildung 3 dargestellten Zylinderzahlen für verschiedene Zylinder-

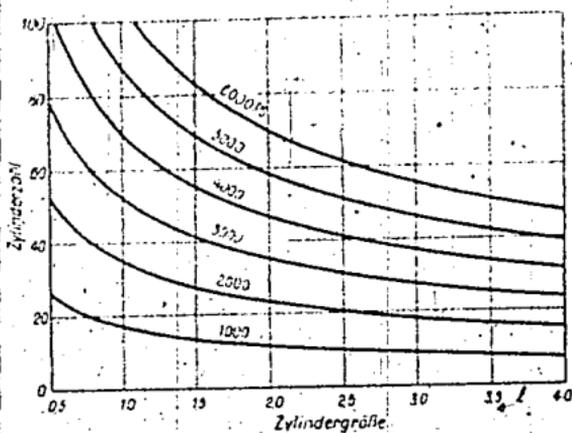


Abb. 3

Zylinderzahl und Zylindergröße für verschiedene Leistungen

größen und Nutzleistungen. Für eine Nutzleistung von 4000 PS ergibt sich z. B. bei Verwendung von 3 l-Zylindern, die bei Triebwerken mit höheren Zylinderzahlen als oberste Grenze angesehen werden können, die Zylinderzahl 36, bei 2 l-Zylindern 48 und bei 1 l-Zylindern 72. Die erforderlichen Gesamthubräume stehen also im Verhältnis

$$36 \cdot 3 : 48 \cdot 2 : 72 \cdot 1 = 1,5 : 1,33 : 1.$$

Von wesentlicher Bedeutung für die mögliche Unterteilung der notwendigen Gesamtkolbenfläche ist die Frage des Baugewichts. Bei geometrisch völlig ähnlich gebauten Zylindern nimmt das auf die Kolben-

flächeneinheit bezogene Gewicht, das Kolbenflächengewicht, bei kleineren Durchmessern ab. Da eine vorgeschriebene Gesamtleistung bei derselben Kolbenflächenleistung eine gleich große Gesamtkolbenfläche erfordert, müßte demgemäß das Gesamtgewicht bei kleineren Abmessungen fallen.

Praktisch ist dies jedoch aus Gründen der Herstellung und Handhabung nicht zu verwirklichen, der kleinere Zylinder wird, bezogen auf die Kolbenfläche, nur wenig leichter. Dazu kommt noch der Einfluß des Gewichts des Gehäuses, der Kurbelwelle, des Getriebes und der Hilfsgeräte, das sich nicht immer im Verhältnis der Hubräume verringern läßt.

Einen Anhalt für die bei verschiedenen Zylindergrößen praktisch erreichbaren Hubraumgewichte ergeben die von Bensinger und Denkmeier [5] durchgeführten konstruktiven Untersuchungen an Boxermotoren, deren Ergebnisse in Abbildung 4 dargestellt sind. Demnach nimmt das Hubraumgewicht mit verkleinerter Zylindergröße zu. Mit der Vermehrung gleich großer Zylinder nimmt es etwas ab, da dann die Gewichte des Getriebes und der Hilfsgeräte stärker zurücktreten. Dagegen bleibt das Kolbenflächengewicht fast konstant (Abbildung 4). Demgemäß ergeben sich dann auch für alle Zylindergrößen bei vorgeschriebener Gesamtleistung nahezu dieselben Gesamtgewichte, wenn man die gleiche Kolben-

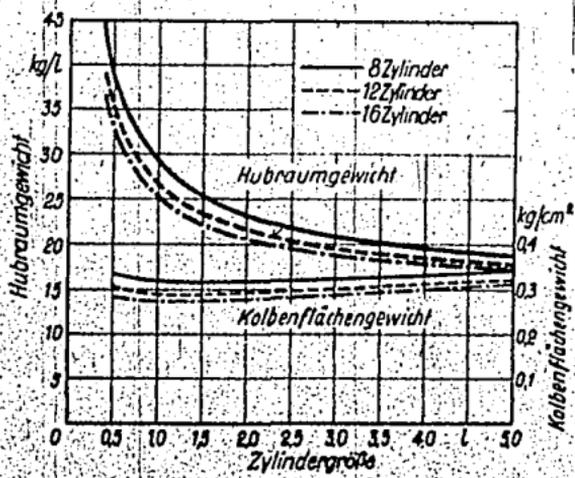


Abb. 4

Hubraum- und Kolbenflächengewicht in Abhängigkeit von Zylindergröße und Zylinderzahl (nach W. D. Bensinger und H. Denkmeier)

flächenleistung annimmt. Dies bedeutet, daß auch der vielzylinderige Motor sich nicht schwerer baut und dasselbe Leistungsgewicht wie der Motor mit großen Zylindern ergibt. Beachtet man aber die höhere Belastbarkeit des kleineren Zylinders und legt man den weiteren Betrachtungen die Kolbenflächengewichte des 16-Zylinder-Motors zugrunde, die sich für eine bestimmte Zylindergröße bei weiterer Vermehrung der Zylinder nur noch unwesentlich verändern dürften, so erhält man die in Abbildung 5 über der Zylinderzahl dargestellten Leistungsgewichte.

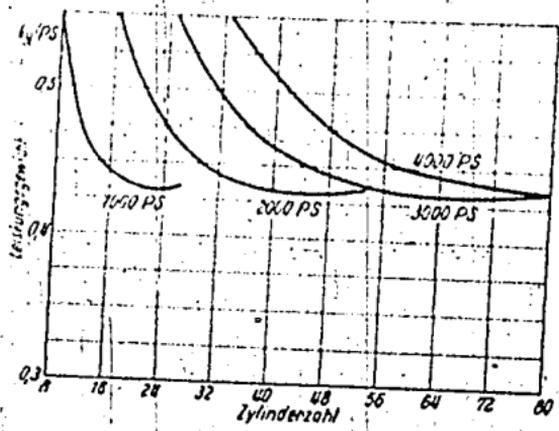


Abb. 5
Leistungsgewicht abhängig von der Zylinderzahl

für die Leistungen 1000 bis 4000 PS. Für eine verlangte Leistung gibt es unter den getroffenen Annahmen eine recht hoch liegende günstigste Zylinderzahl. Die zugehörige Zylindergröße liegt nach Abbildung 3 jeweils noch unter 1 l. Unterhalb des Bestwertes macht sich der Einfluß der schlechteren Leistungsausbeute des größeren Zylinders und oberhalb der steile Anstieg des Hubraumgewichts (Abbildung 4) bei sehr kleinen Zylindern geltend.

Nach einem Vorschlag von O. Steigenberger läßt sich aus einer Darstellung der Leistungsgewichte und Kolbenflächenleistungen ausgeführter Motoren nach Abbildung 6 der gesetzmäßige Zusammenhang zwischen beiden Werten erkennen. Ihr Produkt wäre bei vollkommener Entwicklung aller Motoren eine Konstante. Die Streuung läßt eine gewisse Grup-

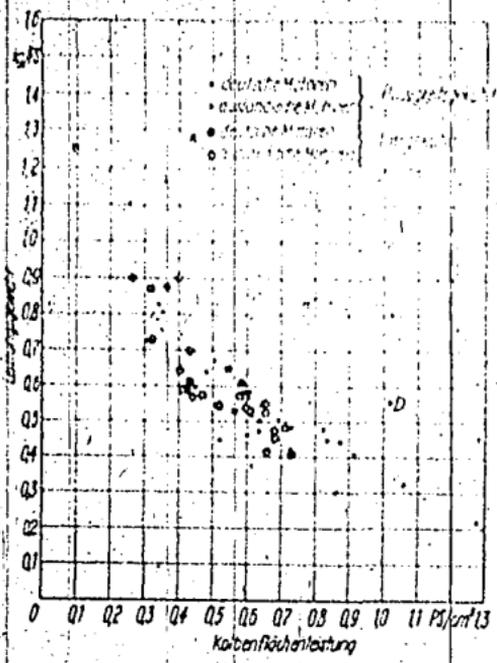


Abb. 6
Kolbenflächenleistung und Leistungsgewicht
von Flugmotoren

pierung der deutschen und ausländischen Muster erkennen. Niedriges Leistungsgewicht bei einer bestimmten Kolbenflächenleistung als hoher Entwicklungsstand angesehen werden.

Bei der Wahl der Zylinderanordnung spielt die Stirnflächenleistung, d. h. die je m² Stirnfläche erzielbare Leistung, aus aerodynamischen Gründen eine Rolle. Der Einfluß der Zylindergröße auf die Stirnflächenleistung sei am Beispiel der Mehrsternbauweise veranschaulicht. Bei Anordnung von 7 Zylindern im Stern lassen sich [6] die in Abbildung 7 über der Zylindergröße für verschiedene Leistungen dargestellten

Stirnflächenleistungen erzielen. Sie steigen für eine vorgeschriebene Leistung mit Verkleinerung des Zylinders an und nehmen bei gegebener Zylindergröße mit höherer Leistung zu, da hierzu mehr Sterne hintereinander geschaltet werden müssen.

Die Bauraumaussnützung wird durch die Bauraumleistung, d. h. die Leistungsausbeute für 1 m³ Bauraum, gekennzeichnet, wobei als Bauraum einfachheitshalber der sicher zu erfassende Zylinderbauraum zugrunde gelegt wird, der sich aus dem Stirnquerschnitt und der von den hintereinander angeordneten Zylindern beanspruchten Baulänge ergibt. Wie Abbildung 8 ebenfalls für die Mehrsternbauweise zeigt, steigt die Leistungsausbeute je Bauraumeinheit mit abnehmender Zylindergröße. Sie ist bei gegebener Zylindergröße unabhängig von der Gesamtleistung.

Die in absehbarer Zeit zu erwartende Steigerung der Kolbenflächenleistung würde die erforderlichen Zylinderzahlen nur dann nennenswert verringern, wenn die Ansprüche an die Gesamtleistung unverändert blie-

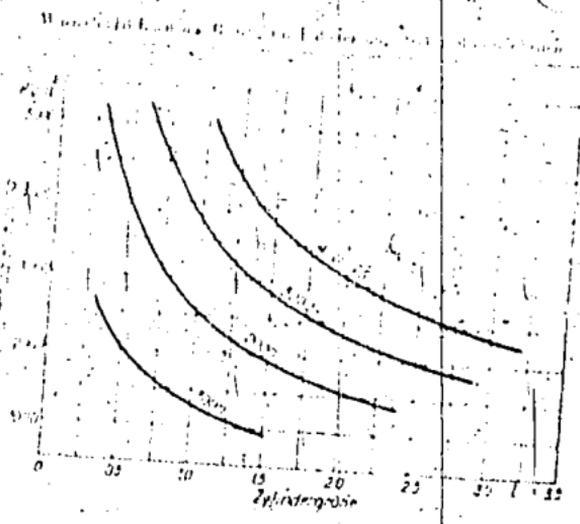


Abb. 7

Stirnflächenleistung von Mehrsternmotoren mit 7 Zylindern je Stern

ben. Dies ist aber auf Grund der bisherigen Entwicklung kaum anzunehmen. Wird z. B. die Kolbenflächenleistung um 50% gesteigert, zugleich aber auch eine höhere Gesamtleistung verlangt, z. B. 6000 PS, so sind zu ihrer Verwirklichung mit den Zylindergrößen 3, 2 und 1 l wiederum 36, 48 und 72 Zylinder erforderlich, d. h. dieselben Zylinderzahlen, die sich mit der niedrigeren Kolbenbelastung für 4000 PS ergaben. Trotz

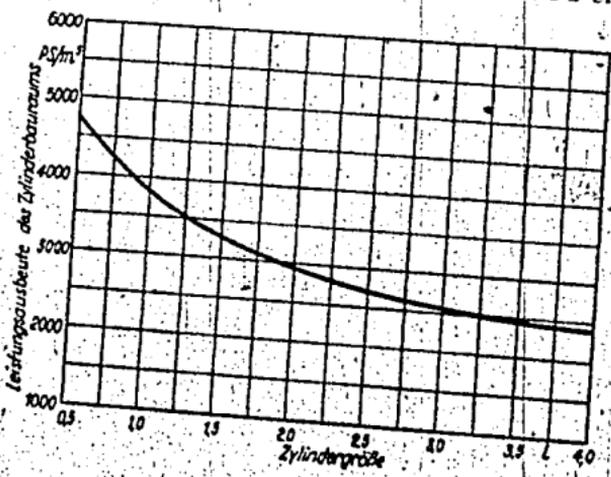


Abb. 8

Bauraumleistung von Mehrsternmotoren mit 7 Zylindern je Stern

immer höherer Ausnutzung des Einzelzylinders ist also für die nächste Zeit mit Zylinderzahlen zu rechnen, die neue Lösungen für ihre Anordnung notwendig machen.

2. Stand der Entwicklung heute bekannter Großtriebwerke

Bevor die Gestaltungsmöglichkeiten für die Erzielung der Leistungssteigerung erörtert werden, sei der heutige Stand der Entwicklung von Großflugmotoren nach Bauweisen und Kennwerten festgestellt.

Bisher sind in der Welt etwa 50 Motoren mit Startleistungen von mehr als 1500 PS bekanntgeworden. Davon sind etwa 20 Muster in der Entwicklung, weitere 10 Muster in der Erprobung und rund 16 Muster in der Serienfertigung oder im Einsatz. In die Betrachtung sind auch zwei ältere Reumotorenmuster mit aufgenommen, die man als erste Flugmotoreinheiten mit Leistungen über 2000 PS ansprechen kann. Die zu vergleichenden Werte sind über der Zylinderzahl und der Zylinderanordnung als den wichtigsten Bezugsgrößen aufgetragen.

a) Bauweisen

Unter den rd. 50 Motorenmustern sind nicht weniger als 11 verschiedene Bauweisen vertreten, mit den Abarten für stehende und hängende Zylinderanordnung sogar 14. Abbildung 9 zeigt Art und Häufigkeit der heute

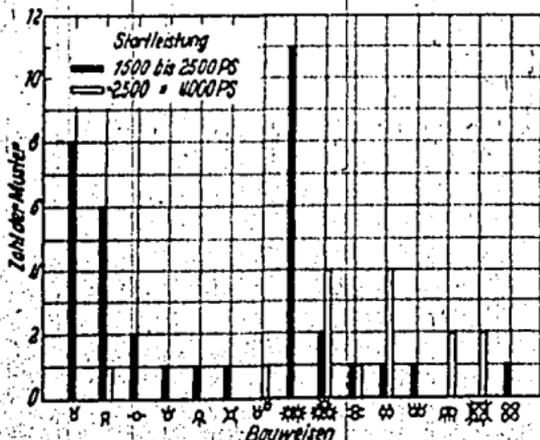


Abb. 9

Art und Häufigkeit der heute angewendeten Bauweisen

angewandten Bauweisen. Die Werte sind unterteilt für Motoren von 1500 bis 2500 PS Startleistung sowie für Motoren von 2500 bis 5000 PS Startleistung. Aus der Darstellung ersieht man, daß für Leistungen von 1500 bis 2500 PS die 12-Zylinder-V-Bauweise und die Zylinder-Doppelsternebauweise vorherrschen. Für Leistungen von 2500 bis 5000 PS tritt dagegen, neben der wachsenden Anwendung von Mehrfachsternebauweisen, eine deutliche Zunahme der Anwendung von Mehrwellentriebwerken in Erscheinung.

Die Bevorzugung dieser Mehrwellenmotoren liegt darin begründet, daß man bei dieser Bauweise — wie später noch ausführlich gezeigt wird — die erheblich größeren Zylinderzahlen noch günstig unterbringen kann, die zur Verwirklichung sehr großer Gesamtleistungen auch bei Anwendung äußerst möglicher Mitteldrücke und Kolbengeschwindigkeiten notwendig sind.

Von den aufgeführten Mustern haben 31 Flüssigkeitskühlung und 15 Luftkühlung; bei zwei Mustern ist die Kühlart unbekannt. Sämtliche Muster arbeiten nach dem Viertakt-Otto-Verfahren, eine Ausnahme bildet nur der 1500 PS starke russische Dieselmotor M 10 F und der Junkers Juno 223.

Die Kraftstoffzuteilung erfolgt, soweit bekannt, bei 21 Mustern durch Einspritzung, teils in die Ladeleitung, teils unmittelbar in die Zylinder. Bei den übrigen Motorenmustern finden Vergaser Verwendung, die neuerdings vielfach als Einspritzvergaser mit fallendem Luftstrom ausgeführt sind; hiermit ergeben sich Verbesserungen insbesondere bei Verwendung von Sicherheitskraftstoffen.

Weitere Besonderheiten bilden die zunehmende Verwendung der Schiebersteuerung, mit der etwa 5 Muster versehen sind, und die Verwendung des Abgasturboladers bei etwa 12 Mustern.

b) Kennwerte

Zur Darstellung der allgemeinen Kennwerte ist die Startleistung der verschiedenen Motorenmuster in Abbildung 10 in Abhängigkeit von der Zylinderzahl und Zylinderanordnung aufgetragen.

Daraus ist im Mittel eine stärkere Zunahme der Zylinderzahl, als der Steigerung der Leistung entspricht, zu erkennen. Die Leistungsunterschiede bei gleicher Zylinderzahl sind auf die Verschiedenheit der Zylinder-

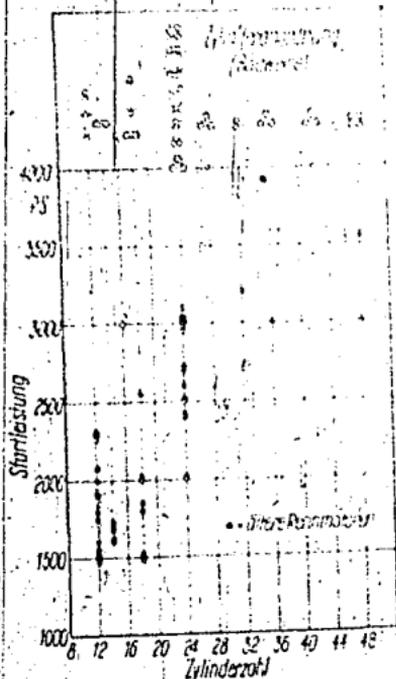


Abb. 10

Gesamtleistung abhängig von Zylinderzahl und -anordnung

in Abbildung 11 für die verschiedenen Motorenmuster aufgetragen ist, zeigt ein gut erkennbares Ansteigen der Leistung mit abnehmender Zylindergröße. Bei der Zylindergröße um 3 l sind die Mehrfachsternmotoren, bei der Zylindergröße um 2 l die Zweiwellenmotoren und bei der Zylindergröße um 1 l die Vierwellenmotoren vorherrschend. Daneben sind noch drei russische Motoren der V- und W-Bauweise und ein deutscher Motor der A-Bauweise mit übergroßen Zylindern von rund 4 bis 4,5 l vertreten.

Der Mitteldruck schwankt bei den verschiedenen Motorenmustern zwischen 9,7 (2-Takt-Diesel) und 15,76 kg/cm². Die Werte liegen, je nach der Zylindergröße verschieden, an der oberen Grenze des heute beherrschten Bereichs. Dasselbe gilt für die mittlere Kolbengeschwindigkeit, die sich bei den einzelnen Ausführungen zwischen 12,3 und 17,6 m/s bewegt. Dementsprechend erreichen die Kolbenflächen-

dergrößen und die Anwendung verschiedener Mitteldrücke und Kolbengeschwindigkeiten, auch in Verbindung mit der Anwendung von Kraftstoffen verschiedener Oktanzahl, zur Erreichung. Die Leistung der älteren Benzinmotoren wird von den heutigen besten Gebrauchsmotoren bei gleicher Zylinderzahl nahezu erreicht.

Abbildung 10 zeigt auch die den einzelnen Zylinderzahlen zugeordneten Bauweisen: Bei den kleinen Zylinderzahlen herrschen die V-Bauweise und die Doppelsternbauweise vor, bei Motoren mit 24 Zylindern ist eine Häufung verschiedener Zweiwellenbauweisen zu erkennen, bei größeren Zylinderzahlen findet die Mehrfachsternbauweise und bei den zur Zeit größten Zylinderzahlen die Vierwellenbauweise Anwendung, auf die später noch eingegangen wird.

Die Abhängigkeit der Gesamtleistung von der Zylindergröße, die

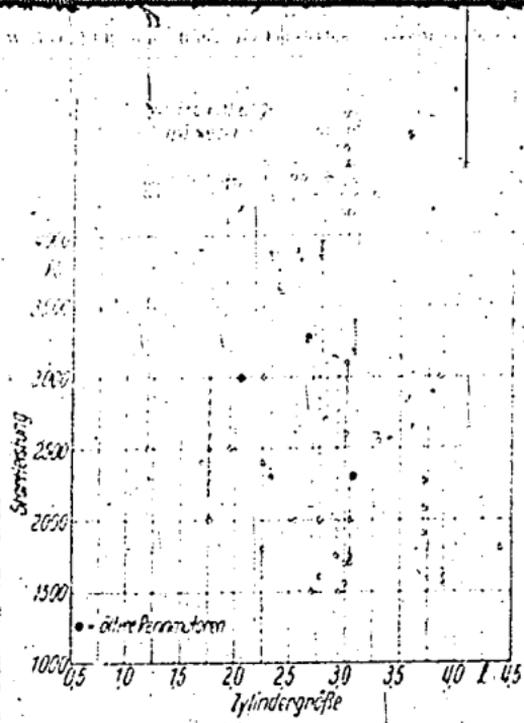


Abb. 11

Gesamtleistung abhängig von Zylindergröße und -anordnung

leistungen, die den Einfluß von Mitteldruck und Kolbengeschwindigkeit in sich zusammenfassen, bei den verschiedenen Motoren Werte von 0,58 bis 0,80 PS/cm² und sogar bis 1,03 PS/cm² bei einem 2-Takt-Diesel.

Im Vergleich hierzu wurden von den Rennmotoren kurzzeitig Mitteldrücke von 17,6 kg/cm², Kolbengeschwindigkeiten von 17,9 und Kolbenflächenleistungen von 1,05 PS/cm² erreicht (Rolls-Royce »R« 1931).

Um das Maß der Baustoff- und Bauraumausnützung zu veranschaulichen, sind in den drei folgenden Abbildungen (12 bis 14) die Leistungsgewichte, Stirnflächenleistungen und Bauraumleistungen der verschiedenen Motoren in Abhängigkeit von Zylinderzahl und Zylinderanordnung aufgetragen. Die Einteilung der Abszissenachse ist dabei bezüglich Zylinderzahl und Zylinderanordnung die gleiche wie in Abbildung 9.

Nach Abbildung 12 liegen die Leistungsgewichte etwa zwischen 0,4 und 0,6 kg/PS. Mit wachsender Zylinderzahl ist ein Abnehmen der Leistungsgewichte feststellbar. Das Leistungsgewicht der Rennmotoren liegt weit unter den üblichen Werten.

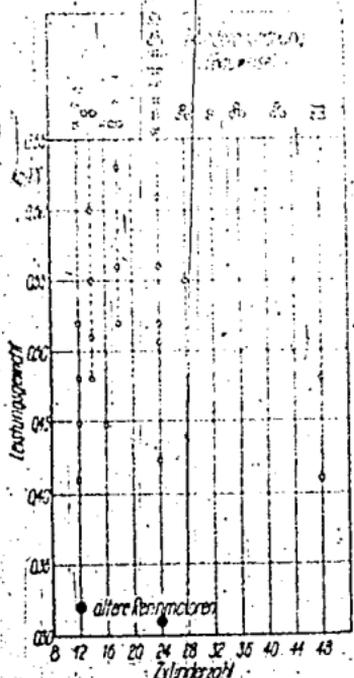


Abb. 12
Leistungsgewicht abhängig von Zylinderzahl und -anordnung

Die in Abbildung 13 dargestellte Abhängigkeit der Stirnflächenleistung von der Zylinderzahl und Zylinderanordnung läßt die günstigen Werte der V-Motoren im Gegensatz zu denen der 11- und 12-Zylinder-Doppelsternmotoren erkennen. Die Bauweisen mit mehr als 12 Zylindern weisen ein ständiges Anwachsen der Stirnflächenleistung auf, so daß schließlich die Bestwerte der V-Motoren übertroffen werden. Die von Rennmotoren erreichten Höchstwerte fallen auch hier wieder heraus.

Die in Abbildung 14 aufgetragene Bauraumausnutzung zeigt einen der Abhängigkeit der Stirnflächenleistung weitgehend entsprechenden Verlauf. Der geringste Wert liegt demgemäß bei den Doppelsternbauweisen.

3. Konstruktive Möglichkeiten einer weiteren Leistungssteigerung

Sowohl die grundsätzlichen Überlegungen als auch der Entwicklungsstand des Großflugmotorenbaus weisen darauf hin, daß die Weiterentwicklung zu höheren Leistungen heute in erster Linie von der konstruktiven Unterbringung der zahlreichen Zylinder abhängt, die zu ihrer Verwirklichung notwendig sind. Für die Anordnung der Zylinder gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten, die bisher vorwiegend benutzte Einwellenbauweise und die Mehrwellen- oder Gruppenmotorbauweise.

Bei der Einwellenbauweise muß man zur Unterbringung einer größeren Zylinderzahl entweder — wenn man vom Reihomotor ausgeht — mehr Zylinder auf eine Kurbelkröpfung arbeiten lassen oder — wenn man vom Sternmotor ausgeht — die Zahl der Kurbelkröpfungen erhöhen. Auf dem ersten Wege kam man zum W- und zum X-Motor, auf dem zweiten zum Mehrfach-Sternmotor. Auf beiden Wegen stoßen wir heute bei einer weiteren Vermehrung der Zylinder im Zusammen-

hang mit der Weiterentwicklung zu höheren Drehzahlen und Mitteldrücken auf große Schwierigkeiten. Infolge der großen bewegten Massen und der großen auftretenden Kräfte wachsen die Beanspruchungen der Läger und des Kurbelgehäuses, das bei großen Zylinderzahlen zudem stark durchbrochen und daher gegen Biegung und Verdrehung wenig widerstandsfähig ist. Besondere Beachtung verdient dabei das Schwingungsverhalten.

Bei luftgekühlten Motoren, die man für absehbare Zeit mit einzelstehenden Zylindern ausführen wird, fällt die versteifende Wirkung des Zylinderblockes fort, so daß sich hier die Schwierigkeiten in erhöhtem Maße geltend machen. Die Schaffung ausreichender Kühlluftquerschnitte macht bei luftgekühlten Motoren weiter die Anwendung großer Schubstangenverhältnisse notwendig, was zwar etwas steifere Gehäuse ergibt, dafür aber gewichts- und kräftemäßig wieder ungünstig ist.

Als wesentlich wird im allgemeinen die Vergrößerung der Störungsanfälligkeit bei Vermehrung der Zylinder angesehen. Selbst die geringste Störung kann beim Einwellenmotor zum Ausfall des gesamten Triebwerks führen. Um dem zu begegnen, muß eine Einschränkung in der Leistungsausbeute in Kauf genommen werden, was gerade für die weitere Leistungssteigerung nachteilig ist.

Diese aus der Zusammenfassung vieler, auf eine Welle arbeitender Zylinder entstehenden grundsätzlichen Schwierigkeiten weisen den Weg zur Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere Zylindergruppen und damit zur Gruppenmotor- oder Mehrwellenbauweise.

Die Gruppenmotorbauweise vereinigt mehrere Teilmotoren zu einem gemeinsamen Triebwerk. Da die auftretenden Kräfte sich dabei

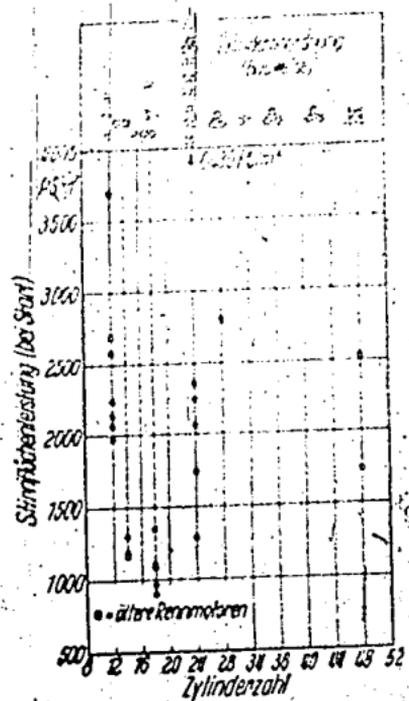


Abb. 13
 Stirnflächenleistung abhängig von Zylinderzahl und -anordnung
 Stirnfläche:
 für V-Motoren
 $F = 0,8 \times \text{Höhe} \times \text{Breite}$
 für Stern- und Mehrwellen-Motoren
 $F = D^2 \cdot n / 4$

auf mehrere Kurbelwellen verteilen, sind die Beanspruchungen von Wellen, Lagern und Gehäuse entsprechend geringer als bei der Einwellenbauweise. Durch Verwendung bewährter Bauelemente für die Teilmotoren lassen sich die sonst nur von der Vielzahl der Triebwerke resultierenden Schwierigkeiten auf ein Mindestmaß beschränken. Da die Teilmotoren vorgegebene Leistungsleistungen bilden, ist es mit Verhältnismäßig geringen Mitteln möglich, die Teilmotoren abschaltbar zu machen, so daß bei auftretenden Schäden diese und der Ausfall auf den betroffenen Teilmotor beschränkt bleiben. Die Betriebssicherheit wird dadurch bedeutend erhöht.

Beim Zusammenfügen der Teilmotoren kann man die Kurbelwellen entweder axial hintereinandersetzen oder parallel nebeneinander anordnen. Bei sehr hohen Leistungsansprüchen kann man auch beide Möglichkeiten miteinander verbinden.

Auf dem ersten Wege entsteht die sogenannte Tandem-Bauart, wobei als Teilmotoren einfache oder mehrfache Reihen- oder Sternmotoren Verwendung finden können. Schwierigkeiten bereitet hier die Übertragung der Leistung, die im allgemeinen an der Wellenkupplung zwischen den Teilmotoren entnommen wird, zur Luftschraube.

Der zweite Weg ist nur für den Reihemotor günstig beschreibbar. Man erhält hierbei die H-, die Doppel-V-, die Doppel-W-Bauweise. Die Leistungsübertragung von den Teilmotoren auf die Luftschraubenwelle bietet grundsätzlich keine Schwierigkeiten; solche bestehen höchstens für die Unterbringung des notwendigen Übersetzungsverhältnisses. Für Gewicht, Raumbedarf, Bedienung und Wartung ist es bei Nebeneinanderanordnung der Wellen weit zweckmäßiger, die Teilmotoren in einem besonderen Gehäuse zu einer Einheit zusammenzufassen, als vorhandene Motoren unter Beibehaltung ihrer Gehäuse zusammenzukoppeln.

Die bisher ausgeführten Bauarten von Gruppenmotoren sind — mit einer noch zu behandelnden Ausnahme — Zwillingsmotoren. Hält man an der bewährten Anordnung von sechs Zylindern je Reihe fest, so kann man auf diese Weise 24 Zylinder unterbringen. Die mögliche Leistungssteigerung ist demnach beschränkt. Um bei dem heutigen Entwicklungsstand eine Leistung von 3000 PS zu verwirklichen, muß man bereits zu Zylindern von mehr als 3 l Hubraum greifen und die sich daraus für Gewicht und Raumbedarf ergebenden Nachteile in Kauf nehmen. Der Einbau in das Flugzeug bereitet bei manchen Zweiwellenmotoren

Schraubentenden und schrauben-
 deren Verbindungsstücke ein
 Die Anordnung von Strahltrieb-
 mit 1. Bauraum, wenn auch
 immer in zunehmendem Maße

Erst bei Weiterentwicklung
 der Zwölfzylinder zu einem
 symmetrisch um die mittlere
 Schraubewelle gebauten Vier-
 wellenmotor mit dem V-
 Motor als Teilmotor, Abbil-
 dung 15, erhält man ein Trieb-
 werk, das neben dem Vorteil
 der Verwendung nur bewährter
 Baugruppen eine ausgezeichnete
 Stirnflächen-, Bauraum-
 und Baustoffausnützung auf-
 weist und dessen Leistungsgren-
 zen heute noch nicht abzusehen
 sind. Die Unterteilung in Ein-
 zelgruppen und die symmetri-
 sche Anordnung gestatten die
 bestmögliche Ausnützung des
 Einzelzylinders auch bei An-
 wendung hoher Drehzahlen
 und Mitteldrücke, ohne daß zu-
 sätzliche Schwierigkeiten zu er-
 warten sind, und eine sichere
 Aufnahme der auftretenden
 Kräfte, einschließlich der von
 der Luftschraube herrühren-
 den. Das Kurbelgehäuse wird
 leicht und steif, was besonders
 bei einzelstehenden Zylindern
 wichtig ist.

Durch die Abschaltmög-
 lichkeit der Teilmotoren wird

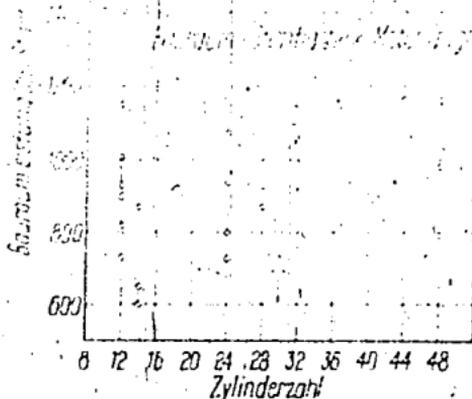


Abb. 11
 Bauraumleistung abhängig von Zylinderzahl
 und -anordnung

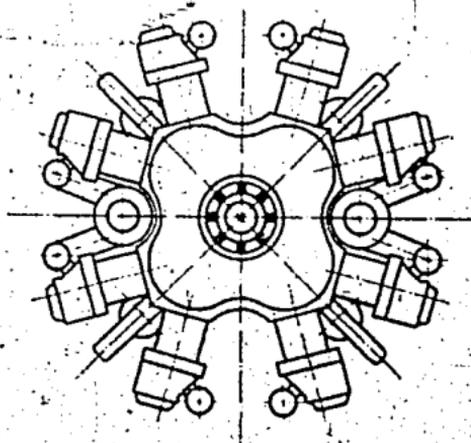


Abb. 15
 Zylinderanordnung beim Vierwellen-
 Gruppemotor

dem Einwand gegen die Anwendung vielzylinderiger Triebwerke — der größeren Störung-fälligkeit — der Bodennutzen. Bei Ausfall eines Teilmotors werden Flugleistung und Flugeigenschaften nur wenig beeinträchtigt. Darüber hinaus werden aber durch den Gruppenmotor und insbesondere den Vierwellenmotor Möglichkeiten geschaffen, die ihn weit über den Einwellenmotor hinausheben. Im Reiseflug mit geringem Leistungsbedarf können ein oder mehrere Teilmotoren abgeschaltet werden, so daß die restlichen Motoren in Leistungsbereiche mit günstigerem spezifischem Kraftstoffverbrauch gelangen. Dadurch wird eine bedeutende Kraftstoffersparnis erzielt. Mit Rücksicht auf die Schäden, die an stillgesetzten Wälzlagern und Gleitflächen unter der Einwirkung von Erschütterungen auftreten, wird man allerdings die abgeschalteten Motoren nicht ganz stillsetzen, sondern mit niedriger Drehzahl umlaufen lassen. Bei entsprechender Ausbildung der Abschaltkupplungen können vorübergehend stillgesetzte Teile bei Bedarf wieder von den in Betrieb befindlichen Motoren angeworfen werden. Damit ist es auch möglich, den Motoranlasser nur für einen Teilmotor zu bemessen.

Die um die Luftschraubenwelle symmetrisch angeordneten Teilmotoren ermöglichen es, mit Motorkanonen selbst großen Kalibers durch die hohle Schraubenwelle zu schießen. Das Luftschraubenuntersetzungsgetriebe wird, insbesondere auch bei synchron gegenläufigen Luftschrauben, die für hohe Leistungen erforderlich sind, handlich sehr einfach, so daß die Zahnreibungsverluste gering bleiben.

Zwischen den Zylinderreihen zweier benachbarter Teilmotoren entsteht im Motorquerschnitt eine große freie Fläche, die für den Durchtritt der Kühlluft ausgenutzt werden kann. Dies bedeutet eine wesentliche Verbesserung der Kühlungsbedingungen bei Luftkühlung und erweitert den Anwendungsbereich der Luftkühlung auch auf Motoren höchster Leistung. Der entsprechende Raum am Kurbelgehäuse läßt die Unterbringung von Axialladern gleichlaufend mit den Zylinderreihen zu, was Baulänge spart und eine übersichtliche Anordnung der Hilfsgeräte erlaubt. Bei Anwendung von zwei Ladern können in den restlichen beiden Räumen Ölkühler organisch untergebracht werden. Andererseits ist auch die Anbringung von 4 mit den Teilmotoren gekuppelten, also unabhängigen Schleuderladern in Zwillingbauweise am Geräteträger in guter Form möglich. Das steife Kurbelgehäuse kann am hinteren Motorende nach Art des Sternmotors aufgehängt werden.

Wird Flüssigkeitskühlung angewendet, so ist die weitgehende Ausnutzung der zwischen den Einzelmotoren vorhandenen Kälte für Unterbringung der Hilfsgeräte nahe. Dadurch wird auch die Zugänglichkeit zu den Hilfsgeräten und ein erhebliches Ersparen an Bauteilen die beste Voraussetzung für das kurz nachfolgende schaltete Schiffswechseltriebwerk geschaffen.

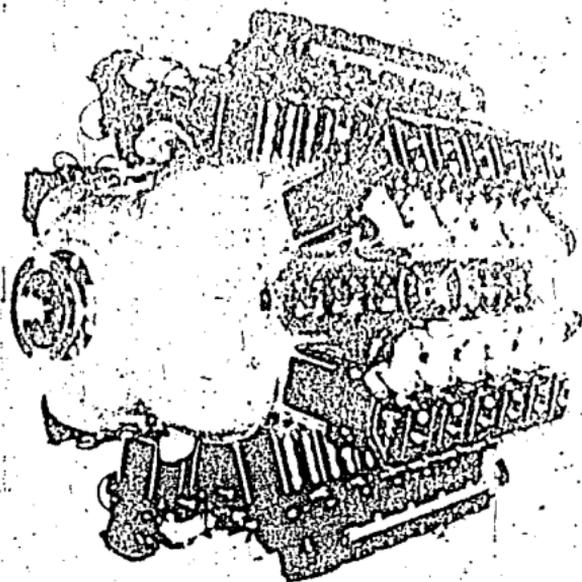
Legt man den erprobten Zwölfzylinder-V-Motor als Teilmotor zugrunde, so werden im Vierwellen-Gruppenmotor 48 Zylinder untergebracht. Mit Zylindern von 11 Hubraum ergibt dies nach dem heutigen Entwicklungsstand gemäß Abbildung 3 bereits etwa 2700 PS. Bei Anwendung von 11,5 l-Zylindern beträgt die Leistung rund 3500 PS und bei 2 l-Zylindern 4000 PS. Während man also bei den herkömmlichen Bauweisen gezwungen ist, sowohl mit der Kollennflächenleistung als auch mit der Zylindergröße bis hart an die Grenze zu gehen, wenn man die heute verlangten hohen Leistungen erzielen will, ist man mit dem Vierwellenmotor in der Lage, allen Leistungsansprüchen, die in absehbarer Zeit gestellt werden, zu entsprechen und dabei großen Spielraum in der Wahl der Beanspruchungen und Abmessungen zu haben. Durch Übergang zum 16-Zylinder-V-Motor und durch Anwendung der Tandem-Bauart lassen sich weitere Möglichkeiten der Leistungssteigerung erschließen.

Um nun mit tragbarem Aufwand die Richtigkeit der vorstehenden Überlegungen nachprüfen zu können und um weitere Unterlagen für einen Motor der Mehrwellenbauweise für hohe Leistungen zu erhalten, hat das Forschungsinstitut für Flugmotoren Stuttgart, zunächst unter Verzicht auf hohe Leistungen, einen luftgekühlten Vierwellen-Gruppenmotor (Motor A) gebaut unter Verwendung der zum HM 512-Motor gehörenden Triebwerks- und Zylinderteile¹⁾.

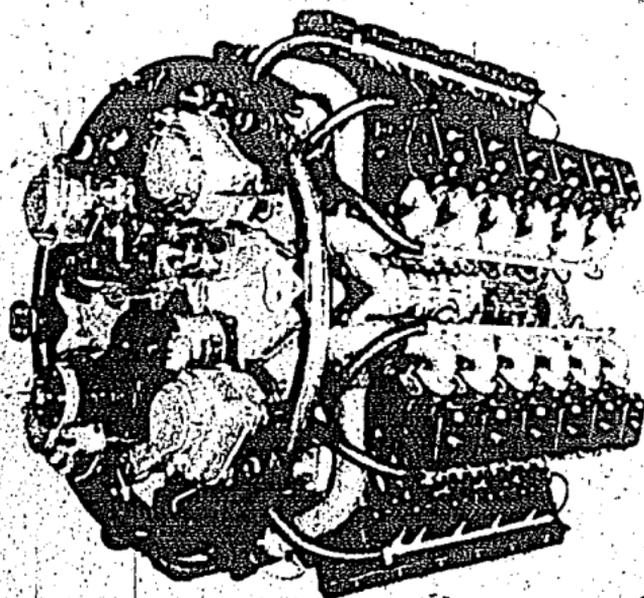
Bei dieser ersten Ausführung wurde auf Abschaltbarkeit der Teilmotoren und Gegenläufigkeit der Luftschrauben verzichtet. Zur Erprobung der Schaltvorgänge wurde aber ein Modellgetriebe für etwa 40 PS gebaut und untersucht.

Die Abbildungen 16 bis 18 zeigen den äußeren Aufbau des A-Motors und einige seiner Baugruppen. Besondere Merkmale sind: das vierteilige, äußerst steife, mit Frischluft gekühlte Kurbelgehäuse; die Leistungsübertragung von den vier in Wälzlagern gelagerten Kurbelwellen über vier durch Klauenkupplungen gesicherte Drehstäbe und Ritzel auf das

¹⁾ Der Bau des Triebwerks wurde durch die tatkräftige Unterstützung von Herrn Messerschmitt ermöglicht.



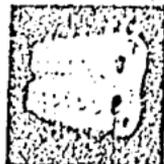
Motor A
Ansicht schräg
von vorne



Motor A
Ansicht schräg
von hinten



a



b



c



d



e



f

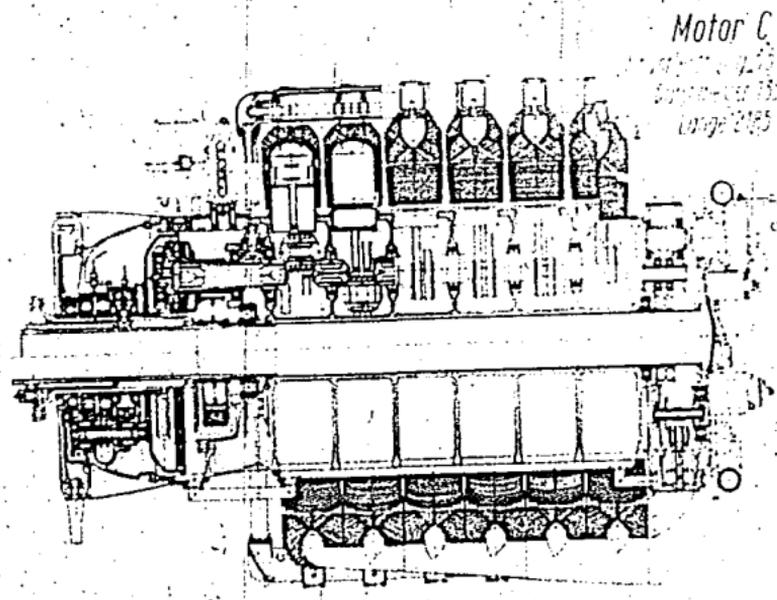
Einzelgruppen des Motors A

- a Kurbelgehäuse eines Teilmotors.
- b Zusammenfassung zweier Teilgehäuse.
- c Gesamtgehäuse Luftschraubenwelle.
- d Antrieb der Luftschraubenwelle.
- e Geräteantrieb.
- f Seitenansicht des Gesamtgehäuses.

gemeinsame Luftschraubenrad; die beiden vierstufigen Axiallader, die zusammen mit den auch bei Teilabschaltung in Betrieb bleibenden Hilfsgeräten von der Luftschraubenwelle aus über eine mittige Hohlwelle angetrieben werden; getrennter Antrieb der Zünder, Kraftstoffeinspritzpumpen und der Boschöler für die Pleuellager von den Pleuell- oder Pleuellwellen aus; Sammelleinspritzung des Kraftstoffs in die Saugleitungen vor Eintritt in den Lader; Möglichkeit des Anbaus einer Motorkarone zum Durchschießen durch die hohle Pleuellwelle.

Der Motor A erreicht mit Zylindern von 11 Hubraum und mit nur rund 0,45 PS/cm² Pleuellflächenleistung bei Verwendung eines Kraftstoffs der Oktanzahl 87 eine Startleistung von 1900 PS. Die beiden Versuchsausführungen des Motors wurden am Boden und auf dem Höhenprüfstand erprobt und zu durchaus zufriedenstellendem Arbeiten mit Ladedruck- und Kraftstoffeinspritzregelung gebracht. Bis jetzt wurden

Betriebszeiten von 1000 bis 1500 Stunden.
 an diesem Motor, der in der Praxis
 bei Einsatz bei 1000 Stunden
 von 700 bis 1000 PS.
 111 Zylinder, die bei 1000
 bei voller Leistung 1000 PS
 gelt darauf, was die
 einen Wert, wie er beim BMW
 größerung des Zylinderinhalt
 gen noch nicht untragbar vor
 1350 PS erreicht wird. Bei
 wird mit der Kolbenflächenber
 5200 PS bei 1300 mm Aufendurcher
 über hinaus, aber können diese
 der kleine Zylinder eine wesent
 fast 37 große Zylinder des BMW



Motor C

111 Zylinder
 Zylinder-Ø 1350 mm
 Länge 2175 mm

Abb. 19
 Motor C
 Schnitzzeichnung (bei Verwendung von Axialladern)

4. Leistungszusammenfassung und Reichweite

Die Anwendung starker Motoreinheiten, die eine Zusammenfassung der gesamten Leistungserzeugung in oder in der Nähe der Flugzeuglängsachse gestattet, bringt an sich schon meistens eine Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs und damit der Reichweite, als der Luftwiderstand eines solchen Flugzeugs unter vergleichbaren Bedingungen kleiner ist als der eines Flugzeugs mit starker unterteilter Leistungserzeugung. Die Verkleinerung des Luftwiderstands durch die Zusammenfassung der Motoranlage ist hierbei sowohl mittelbar, indem das Flugzeug leichter und kleiner wird, als auch unmittelbar, indem der auf die Flügelfläche bezogene Luftwiderstand mit kleiner werdender Zahl einzeln angeordneter Motoren abnimmt. So wird z. B. bei aerodynamisch gleich guter Durchbildung der Widerstandsbeiwert eines einmotorigen Flugzeugs um rund 30% kleiner ausgefallen als der eines Flugzeugs mit zwei Seitenmotoren.

Durch besondere Ausbildung der starken Motoreinheiten als Gruppennmotoren mit abschaltbaren Teilmotoren besteht jedoch die Möglichkeit, den Kraftstoffverbrauch und die Reichweite noch weit mehr zu verbessern [7].

Der spezifische Kraftstoffverbrauch eines normalen Großtriebwerks ohne Abschaltgetriebe wird sich, wenn man gleiche mechanische und thermodynamische Durchbildung voraussetzt, bezüglich seiner Höhe und seines von der Belastung und Drehzahl abhängigen Verlaufs weitgehend mit dem eines mittleren Triebwerks von etwa 1200 PS Startleistung decken. Unter dieser Voraussetzung darf man die in Abbildung 21 aufgetragenen Kraftstoffverbrauchskennlinien, die mit heutigen mittelstarken Gebrauchsmotoren erzielbare Bestwerte darstellen, größenordnungsmäßig auch für beliebig starke Großflugmotoren als gültig ansehen.

Auch für den spezifischen Kraftstoffverbrauch des Mehrwellenmotors mit abschaltbaren Teilmotoren gilt größenordnungsmäßig der Verlauf nach Abbildung 21, und zwar sowohl für das Triebwerk als Ganzes als auch für jeden seiner Teilmotoren. Beim Betrieb mit Abschaltung wird jedoch eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs erzielt, indem selbst bei sehr kleinen Belastungen des Gesamttriebwerks die Belastung der arbeitenden Teilmotoren so hoch gehalten werden kann, daß sie stets in der Nähe der Bestwerte ihrer Verbrauchskennlinien arbeiten. In Abbildung 22 sind die Reichweiteverbesserungen aufgetragen, die für ein Flugzeug mit einem Vierwellentriebwerk von 3000 PS Startleistung bei

Ab-schaltung von zwei bis drei Teil-tri-ebwerken errechnet worden sind. Bei diesem Beispiel ist die Rechnung bis hinab auf Klein-ge-schwindigkeit von 50% der Höchstgeschwindigkeit durchge-führt worden. Dies entspricht einer Geschwindigkeitsenkung, die etwa für Jagdflugzeuge erfor-derlich wird, die Kampfflugzeuge über längere Strecken geleiten sollen, und ergibt Kleinbelastung des Gesamttriebwerks von rund 20% der Nennleistung gegen-über etwa 40% im normalen Spar-flug.

Je nach der Reisegeschwindig-keit beträgt nach Abbildung 22 die gegenüber dem Triebwerk ohne Abschaltung erzielbare Reichweiteverbesserung 25 bis 55%. Das Abschalten des dritten Teilmotors bringt erst unter 51% der Höchst-geschwindigkeit Vorteil.

Die Bestwerte der ver-schiedenen Betriebsweisen wurden durch Berechnung einer Verhältnissgröße ermit-telt, die den Einfluß von Luftschraubenwirkungsgrad, Gleitzahl des Flugwerks und spezifischem Kraftstoffver-brauch zusammenfaßt. Bei Teilmotoren-Abschaltung er-wies sich reine Drehmomen-tenregelung, ohne Abschalt-ung, dagegen — wegen des mit der großen Drehzahl-senkung verbundenen hohen Abfalls des Luftschrauben-

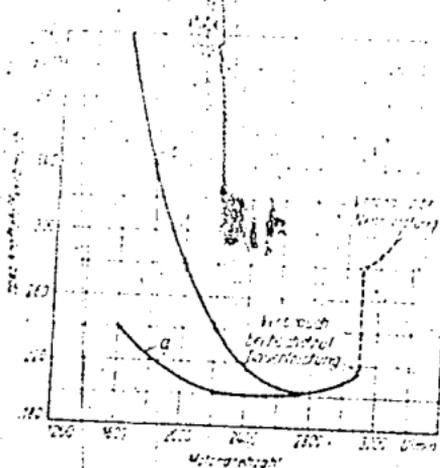


Abb. 21
Kraftstoffverbrauch abhängig von Drehzahl und Belastung in 5000 m Flughöhe
a Reine Drehmomentenregelung;
b Reine Drosselregelung bei fester Luftschraubenstellung

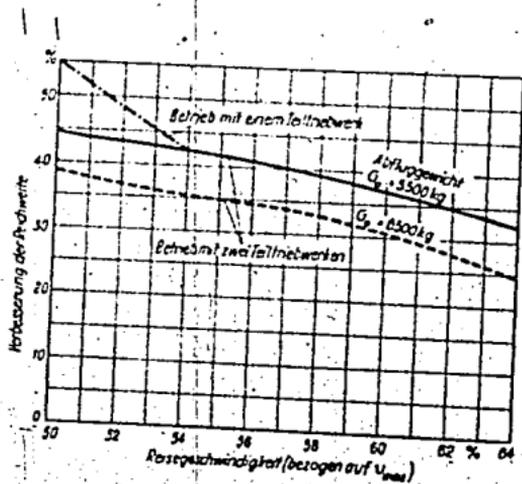


Abb. 22
Reichweiteverbesserung durch Abschalten von Teiltriebwerken

wirkungsgrad- und Drehmoment als günstigste Regelung für die Leistung. Die Annahme für die Luftschraube gelten für eine Vielblatt-Verstellluftschraube von 1,3 bis 1,4 m mit einem von 0,6 bis 0,8 Wirkungsgradverhältnis, ab einem Mach-Zahlbereich von 0,7 bis 0,8 ist extrapoliert worden.

5. Zylinderzahl und Herstellkosten

Bei den Überlegungen über die günstigste Zylinderzahl je Triebwerk tritt auch die Frage auf, ob in der Herstellung viele kleine oder wenig große Zylinder vorteilhafter sind, oder ob eine günstigste Zylindergröße eindeutig ermittelt werden kann. Die Beantwortung dieser Frage fällt nicht unmittelbar in das Arbeitsgebiet eines Forschungsinstituts und ist naturgemäß sehr schwierig, da einerseits die Herstellkosten sich als Summe sehr vieler Einzelgrößen, wie Stückzahl und -größe, Werkstoffaufwand und -güte, Herstellungsmethoden und Einrichtungen, Grad der Beanspruchungs- und herstellungsgerechten Durchbildung usw. ergeben und da andererseits die zu betrachtenden Triebwerke Zylinderzahlen aufweisen, über die noch nicht genügend Unterlagen vorliegen. Bei der Bedeutung der Herstellkosten für die Entwicklung von Vielzylindermotoren hoher Leistung soll trotzdem, soweit die Unterlagen reichen, ein Einblick in das Kostenverhalten versucht und für weitere Ermittlungen Anregung gegeben werden.

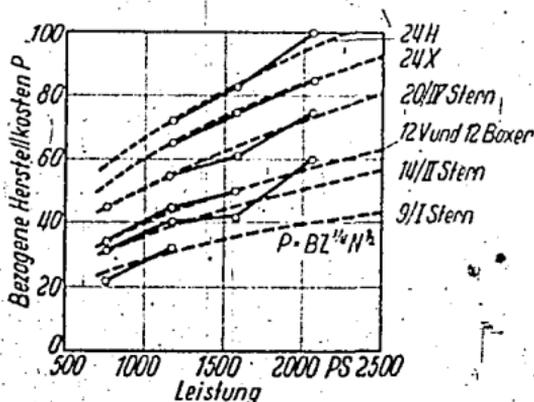


Abb. 23

Bezogene Herstellkosten von Flugmotoren.

— nach Fedden,

- - - nach Jaklitsch gemäß der Beziehung $P = B Z^{3/4} N^{1/2}$, wobei P Kosten, B Kennwert der Bauweise, Z Zylinderzahl, N Gesamtleistung sind

motoren hoher Leistung soll trotzdem, soweit die Unterlagen reichen, ein Einblick in das Kostenverhalten versucht und für weitere Ermittlungen Anregung gegeben werden.

Fedden [9] hat für Stern-, V-, Boxer-, H- und X-Motoren mit Leistungen von 750 bis 2100 PS bei Anwendung von 9 bis 24 Zylindern die bezogenen Herstellkosten angegeben, die in Abbildung 23 als ausgezogene Linien über die Leistung auf-

getragen sind. Eine von Jahnke [10] aufgestellte Beziehung $P = BZ^{\alpha}$ (wobei P die Kosten, B ein Kennwert für Bauweise, Z die Zylinderzahl, α die Gesamterzeugung bedeuten) zeigt für gewöhnlichen Leistungsbereichen die sich den von Földes angegebenen Werte mit einem $\alpha = 0,25$ (Abb. 23) ist ersichtlich, daß der Zusammenhang zwischen B und Z nicht verhältniß der Zylinderzahl mit der Leistung zunimmt, sondern umlangläufiger. Dabei zeigt sich auch die aus sich bekannte Tatsache, daß der Sternbauweise kleinere Werte P , d. h. geringere Kosten bei gleicher Leistung entsprechen. Das stärkere Ansteigen der Kosten einiger Bauweisen bei höheren Leistungen weist darauf hin, daß der für diese Bauweise günstige Leistungsbereich überschritten ist. Dies zeigt sich am Doppelsternmotor mit 11 Zylindern bei Leistungen über 1600 PS; im Gegensatz dazu ist beim 24-Zylinder-X-Motor dieser Einfluß bei den untersuchten Leistungen noch nicht zu erkennen. Die Aufteilung einer bestimmten Leistung auf zwei Einheiten erhöht die Fertigungskosten.

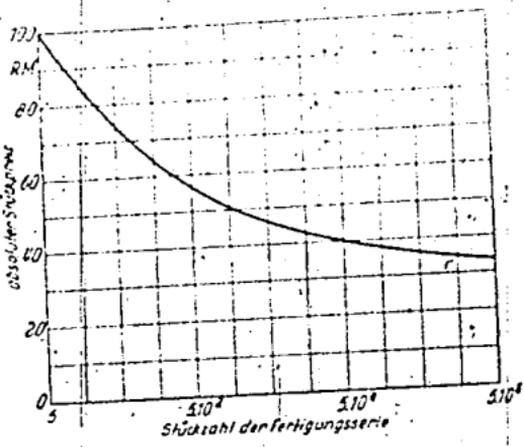


Abb. 21. Zusammenhang zwischen Stückzahl und Stückpreis (nach F. Kesselring)

Von den Einflüssen auf die Gesamtkosten scheinen zunächst die Stückzahl und damit die Einrichtungen besonders wichtig zu sein, wie aus Abbildung 24 hervorgeht, die den Stückpreis über der Stückzahl zeigt [11]. Nach Angabe der Hersteller ist zwar bei den heutigen Stückzahlen für solche Bauteile, die mit der Zylinderzahl oder einem Vielfachen davon am Motor vorkommen, schon der flacher werdende Teil der Kurve erreicht; doch fällt die Kurve auch bei größeren Stückzahlen noch merklich ab, so daß weitere Gewinne an Herstellungskosten durch Vermehrung der Stückzahlen zu erwarten sind. Noch günstiger ist es bei Teilen, die in der Regel nur einmal am Motor vorkommen, wie Kurbelwelle, Kurbelgehäuse, Lader usw. Bei gegebener Fertigungszahl an Motoren könnte hier bei bestimmten Bauweisen, etwa beim Gruppenmotor, durch

die Aufteilung beispielsweise einer großen und teureren Kurbelwelle auf mehrere kleinere Wellen; noch eine bedeutende Herabsetzung des Einzelstückpreises erzielt werden, einmal durch Erhöhung der Stückzahl und dann noch durch die Vorteile, die die Verkleinerung mit sich bringt, wie kleinere Maschinen, Vorrichtungen, weniger Herstellungsschwierigkeiten. Bei anderen Teilen wie Kurbelgehäusen, können gewisse Bearbeitungsvorgänge, z. B. das Bohren der kleineren Zylindersitzflächen, in kürzerer Zeit durchgeführt werden, wenn der vermehrte Zylinderzahl entsprechend mehr Arbeitsspindeln angesetzt sind.

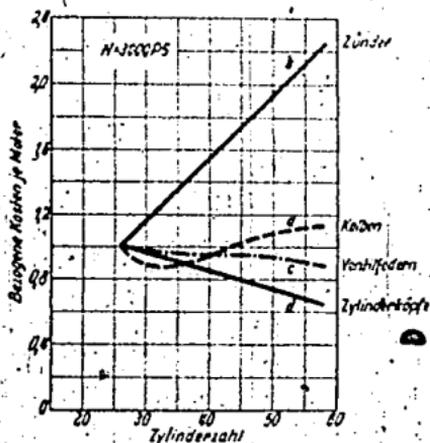


Abb. 25

Preisverhalten von Motorbauteilen abhängig von der Zylinderzahl

engere Toleranzen verlangen und gewisse Arbeitsvorgänge, wie z. B. Kontrolle, anteilmäßig höhere Zeiten erfordern. Zu beachten ist dabei aber, daß die heutigen Einrichtungen besonders für größere Kolben bestimmt sind, was sich ebenfalls auf die Kosten der kleineren ungünstig auswirkt.

Eine der Zylinderzahl verhältnißige Zunahme der Kosten gilt für Teile, wie Zünder, Zündkerzen, Leitungen (Linie b). Die Kosten für Ventilfedern (Linie c) fallen mit steigender Zylinderzahl etwas ab. Schließlich sind noch die Kosten für die Abgüsse luftgekühlter Zylinderköpfe dargestellt (Linie d), deren Gesamtkosten mit größer werdender Zylinderzahl stark abnehmen, obwohl sich die Stückkosten des Einzelkopfes für

Weiter wurde versucht, nach Angaben von Herstellern das Preisverhalten von Teilen festzustellen, die in verschiedener Größe jeweils von demselben Werk gefertigt werden. So zeigt Linie a in Abbildung 25 die Kolbenkosten von 3000-PS-Motoren mit verschiedenen Zylinderzahlen. Dabei ist das Auftreten einer günstigsten Zylindergröße besonders auffallend, die bei etwa 27 je Zylinder liegt. Die größeren Kolben sind ungünstiger, weil sie infolge der höheren Beanspruchungen wesentlich höhere Anforderungen an die Bearbeitung stellen, und die kleineren Kolben, da sie

1, 2 und 3/ Hubraum ungefähr wie 1, 1,9 : 2,6 verhalten. Die Ursache liegt in der höheren Hubraumbelastung des kleineren Kopfes und der entsprechenden Abnahme des Gesamthubraums.

Wie die angeführten Beispiele zeigen, verhalten sich die verschiedenen Bauteile bei Änderung der Zylinderzahl sehr unterschiedlich. Damit ist aber auch die Frage nach dem Preisverhalten des Gesamtmotors noch offen, und es besteht die Aussicht, daß die höheren Zylinderzahlen, insbesondere bei höheren Leistungen, sich nach Anpassung der Herstellungsverfahren vorteilhafter als hier ermittelt verhalten werden.

Beachtenswert ist die von F. Kessring [11] aus statistischen Erhebungen an Werken verschiedener Fertigungsgebiete gewonnene Erkenntnis, daß die Werkstoffkosten bei ungefähr gleicher Art der Fertigung in der überwiegenden Zahl der Fälle den gesamten Gestehungskosten etwa verhältnis sind. Sollte diese Erkenntnis sich auch auf den Vergleich von Flugmotoren gleicher Leistung übertragen lassen, so würde das auf Grund der früheren Betrachtungen über den Einfluß der Zylinderzahl auf den Werkstoffaufwand bedeuten, daß die Gesamtkosten — gleiche Aufteilung der Werkstoffe vorausgesetzt — bei Vergrößerung der Zylinderzahl zum mindesten nicht zunehmen.

In diesem Zusammenhang ist ferner das Getriebe des Wright Duplex Cyclone zu erwähnen, das trotz der starken Aufteilung der zu übertragenden Leistung auf 20 Satelliten-Räder und Herstellung der Lagerzapfen mit dem Planetenstern aus einem Stück den bisherigen Lösungen an Bauroum, Baugewicht und Kosten überlegen ist.

Bei der Betrachtung der Herstellkosten muß ferner auch berücksichtigt werden, daß ein Mehraufwand für den Motor, der zur Einsparung von Bauraum oder Baugewicht führt, sich in den Gestehungskosten des Flugzeugs durch Einsparungen an der Zelle sowie in den Betriebskosten auswirken kann. Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß höhere Kosten allein den technischen Fortschritt noch niemals aufgehalten haben, wenn die dadurch erzielten Vorteile groß genug waren und einem Bedürfnis entsprachen. Wenn erst die Fertigung in Angriff genommen wurde, haben sich noch immer Wege gefunden, die zu einer Kostensenkung führten.

6. Vereinfachungsmöglichkeiten am Motor

Der Aufbau des heutigen schnellaufenden Verbrennungsmotors ist mit bedingt durch die Leistungen, die bisher von ihm verlangt wurden. Diese sind — gemessen z. B. an den Leistungen der umlaufenden Strömungs-

maschinen — als mäßig anzusprechen. Mit der stetigen Fortentwicklung zu höheren Leistungen wird der Konstrukteur vor die Frage gestellt, wie lange noch die heutigen Grundkonstruktionen den wachsenden Leistungsansprüchen zu genügen vermögen, ohne dabei zu anderen, beachtenswertere Schwierigkeiten entstehen. Diese Grenze ist, wie jetzt auch die Erörterung der Gruppenmotorbauweise gezeigt hat, zwar noch nicht erreicht, es dürfte aber nützlich sein, sich heute schon Gedanken darüber zu machen, wie z. B. der mit der Leistung und der Zylinderzahl zunehmende Herstellungs- und Wartungsaufwand sowie die wachsenden Schwierigkeiten der Unterbringung der größeren oder vermehrten Hilfsgeräte, wie Zünder, Einspritzpumpen, Düsen, Kerzen, durch konstruktive Maßnahmen verringert werden könnten.

Deshalb sei auf eine Möglichkeit der Vereinfachung des vielzylindrigen Motors aufmerksam gemacht, die an sich nicht neu ist, aber in dem angedeuteten Zusammenhang Beachtung verdient. Sie besteht in der Zusammenfassung von zwei oder mehr Zylindern zu einer Zylindergruppe mit gemeinsamem Verbrennungsraum.

In Abbildung 26 sind einige Ausführungsmöglichkeiten zusammengestellt. Teilbild a und b zeigen die bekannte Junkers-Gegenkolbenbauweise mit zwei und vier Kurbelwellen. Eine geschickte Abwandlung stellt der Motor nach Teilbild c dar. Eine Zusammenfassung von drei Zylindern zu einem gemeinsamen Verbrennungsraum weist der in Teilbild d dargestellte Michel-Motor auf, dem aber die schlechtere Triebwerks- und Bau-raumausnützung entgegensteht.

Bei nebeneinanderliegenden Zylindern entstehen die Anordnungen nach Teilbild e bis h mit je zwei und vier Zylindern je Verbrennungsraum. Dabei können auch die für den Gaswechselforgang erforderlichen Steuerungs- und Leitungsteile vermindert werden. Schwierigkeiten werden wohl auftreten bei Anwendung der Luftkühlung und beim Zusammenbau der Zylindergruppen zum Vollmotor. Diese Schwierigkeiten dürften aber nicht unüberwindlich sein.

Es wäre denkbar, die Vereinfachung auch an den leistungsübertragenden Bauteilen durch Anwendung doppelt wirkender Anordnungen zu suchen, so daß weniger Kolben, Pleuelstangen, Kurbelkröpfungen, Lager nötig wären. Diese Möglichkeit verspricht aber im Flugmotorenbau wenig Erfolg, da die beiderseitige Beaufschlagung des Kolbens und die Vergrößerung der hin- und hergehenden Massen — besonders infolge der Notwendigkeit der Geradföhrung — eine Herabsetzung von Mitteldruck

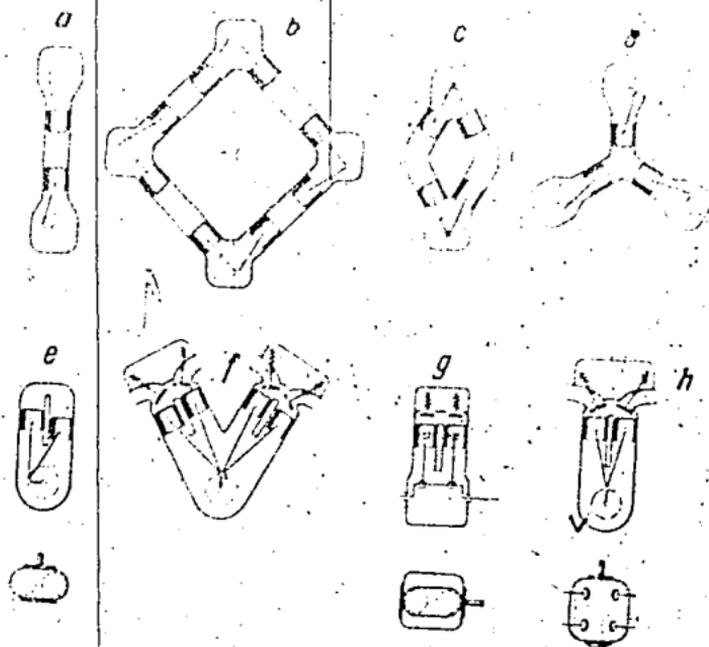


Abb. 26

Vereinfachungsmöglichkeiten des Brennraums

- a Junkers-Gegenkolben-Einreihenmotor mit zwei Kurbelwellen,
- b Junkers-Gegenkolbenbauweise mit vier Kurbelwellen,
- c Gegenkolben-Doppel-V-Motor,
- d Michel-Motor mit drei Kurbelwellen,
- e, f, g, h Zwillings- und Vierlings-Zylinder mit gemeinsamem Brennraum, gemeinsamer Steuerung und gemeinsamem Hubzapfen für je zwei und vier Zylinder

und Kolbengeschwindigkeit erfordern würden, so daß bei der gleichzeitigen Vergrößerung der Motorquerschnitte gegenüber der Normalform keine Vorteile mehr übrigbleiben.

Dieses Beispiel zeigt, daß der Schnellläufer anderen Gesetzmäßigkeiten unterworfen ist als der Langsamläufer. Es ist die Kunst des Konstrukteurs, bei der Verfolgung seines Ziels in Übereinstimmung mit solchen Gesetzmäßigkeiten zu bleiben.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der Verbrennungskolbenmotor noch auf absehbare Zeit in bester Form in der Lage sein wird, den wachsenden Leistungsansprüchen zu genügen und ein breites Anwendungsfeld auszufüllen. Die Grenzen, die heute einer weiteren Leistungs-

steigerung entgegenstehen, lassen sich durch Anwendung kleinerer Zylinder, die sich höher belasten lassen, sowie von Mehrwellenanordnungen, insbesondere der mit besonderen Vorteilen ausgestatteten Antriebsanordnung, bedeutend weiter stecken. Dabei werden auf bewährte Bauformen zurückgegriffen werden kann, ist mit kurzen Entwicklungzeiten bis zur Betriebsreife und mit schließlichen Fronteinsatz zu rechnen.

Die zu der Aufgabe Großtrickwerk angestellten Überlegungen sind nimmehr zahlreich und so tief schürfend, wie es einerseits möglich, andererseits notwendig ist. Sie stimmen in den Hauptlinien überein. Nebensächlichkeiten dürften nur noch am Rande zu bearbeiten sein. Die Kriegsaufgaben aber sollten Anlaß sein, ohne weitere Verzögerung ans Werk zu gehen.

Schrifttum

- [1] W. D. Bensinger: Flugmotoren mit Leistungen über 2000 PS. Technische Ber. Bd 9 (1942) H. 2 S. 57.
- [2] J. Smirca: Kolbentriebswerkeinheiten von 1000 PS. Luftwiss. Bd 9 (1942) Nr 7 S. 219, und Nr. 8 S. 231.
- [3] P. Rickert, und A. Hehl: Leistung und Wärmeabfuhr bei geometrisch ähnlichen Zylindern. Jb. 1938 Dt. Luftfahrtforschg II S. 89.
- [4] M. Kuhn: Der Einfluß der Zylinderbaugröße auf die motorischen Kennwerte und die Baugewichte. Disc. Stuttgart 1939.
- [5] W. D. Bensinger und H. Denkmeier: Einfluß der Zylinderzahl und -größe auf das Baugewicht von Flugmotoren. Ringbuch d. Luftfahrt-Techn. Bd III A 1.
- [6] W. Krautter: Außenabmessungen vielzylindriger Sternmotoren auf Grund der Lüftkühlungsbedingungen. Jb. 1939 Dt. Luftfahrtforschg II S. 313.
- [7] K. Brode und E. Maier: Verbesserung der Flugzeugreichweite bei Verwendung eines Gruppentriebwerks mit einzeln abschaltbaren Teilmotoren. FKFS-Ber. 363.
- [8] D. Walchner: Modellversuche für eine Schraube mit großer Steigung. Lilienthal-Tagungsber. 067/005 S. 35.
- [9] R. Fröden: Flight (1937) S. 198 Suppl.
- [10] F. Jaklitsch: Entwicklung und Bemessung der Hochleistungsmotoren, insbesondere der Flugmotoren. ATZ Bd 42 (1939) S. 273.
- [11] F. Kesselring: Die starke Konstruktion. Z. VDI Bd 86 (1942) Nr. 21/22 S. 321.

Aussprache

Nach einigen allgemeinen Bemerkungen der Herren Liesenlohr und Madelung zu den Ausführungen von Herrn Kamm brachte die Aussprache im einzelnen die folgenden Überlegungen zum Ausdruck:

Christian: Herr Liesenlohr hat schon mit seinen Ausführungen die wesentlichen Einwände gebracht, die gegen den Kammschen Vorschlag sprechen. Ich möchte aber besonders auf zwei Punkte hinweisen, das Baugewicht und die Wirtschaftlichkeit der Herstellung. Herr Kamm hat ein Gewichtsvorteil für den kleinen vielzylindrigen Motor gegenüber dem Motor mit wenigen großen Zylindern in Anspruch genommen. Dieses ist jedoch tatsächlich nicht vorhanden. Der Hochleistungsmotor As 411 leistet bei 12 l Hubraum 600 PS mit $n = 2300$ und $p_f = 1,8$ ata. Er ist sehr leicht gebaut und wiegt 385 kg (betriebsfertig ohne Öl). Ein Vielfachmotor würde kaum leichter als 1600 kg gebaut werden können, also wesentlich schwerer als Herr Kamm angenommen hat. Wir hatten ferner die Aufgabe, aus dem 12-Zylinder-Motor As 402 mit 16,3 l Hubraum und 800 PS bei $n = 3200$ und 1,6 ata einen Doppelmotor As 401 zu bauen, der in der Leistung dem BMW 891 bei gleicher Stirnfläche entsprach. Dieser Vergleich des 24-Zylinders mit 1,37-Zylinder mit dem 14-Zylinder mit 34-Zylinder ergab Gewichtsgleichheit, jedoch nur, weil der 891 ein ausgesprochen schwerer Motor ist, der noch zu höherer Leistung entwicklungsfähig ist.

Aus einer Reihe von Projekten vielzylindriger Motoren haben wir die durch Vergleich ausgeführter Motoren festbegründete Auffassung, daß diese Bauart erst dann sinnvoll ist, wenn bereits eine Grenzgröße des Zylinders mit etwa 2,5 bis 3 l erreicht ist.

In bezug auf wirtschaftliche Herstellung ist der Motor mit wenigen großen Zylindern absolut überlegen. Hierüber liegen einwandfreie Kalkulationswerte auch für die Fertigung großer Stückzahlen vor. So kostet beispielsweise die Kurbelwelle des JUMO 21d mit 1100 PS nur 20% mehr als die des As 411 mit 600 PS. Bei gleichen Rüstzeiten von 900 Minuten beträgt die Bearbeitungszeit des Rippenzylinders des 801 mit 300 Minuten nur das Doppelte derjenigen des 411-Zylinders. Die viel größeren Ventilsitze des 801 erfordern wie diejenigen des As 411 15 Minuten, die Ventillführungen in beiden Fällen etwa 3 Minuten.

Werden noch diejenigen Teile, die in doppelter und vierfacher Zahl bei gleichem Herstellungsaufwand benötigt werden, wie Zylinder, Kerzen, Kabel, Steuerungsteile, welche an sich schon heute Fertigungs-Engpässe bedeuten, in Rechnung gestellt, so ergibt sich für die vielzylindrige Bauart mittlerer Leistung ein untragbarer Aufwand.

von Philippovich: Es ist ein Vergleich zwischen verschiedenen Zylindergrößen gemacht worden, welche Leistung bei einem bestimmten Kraftstoff erreicht werden kann. Ich möchte darauf aufmerksam machen, daß diese natürlich eine Funktion der Art des Kraftstoffs ist. Das Bild verschiebt sich restlos mit dem verwendeten Kraftstoff, weil man bei einem benzolhaltigen, aromatischen Kraftstoff mit Verkleinerung der Zylinder eine ganz wesentlich bessere Leistungssteigerung bekommt, also bei einem paraffinischen oder isoparaffinischen Kraftstoff. Das scheint mir auch der Grund zu

und warum verbleiben Stellen, wo sich die Temperatur überhaupt nicht nach oben ab-
lenkung die Energie der Arbeit, die die Zylinderwand erwärmt, sich nicht auf diesen
Punkt beschränkt, sondern sich über den gesamten Zylinder ausbreitet, so daß die Kraft-
stoffausnutzung von dem Zylinderinhalt her nicht optimal wird.

Caroselli, Berni, Basso, Ferrarini, Ferrarini, Ferrarini, Ferrarini, Ferrarini, Ferrarini
und Herr v. Philippovich hatten auf folgendes hingewiesen. Die Grundlagen für die Lei-
stungsbeurteilung je Kolbenfläche sind die Herr Kamm gewählt hat, waren Versuche,
die strengstens in seinem Institut an geometrisch ähnlichen Zylindern durchgeführt wurden,
die nicht nur an solchen luftgekühlten, sondern auch wassergekühlter Bauart. Herr Kamm
hat seine Proportionen auf einen Nutzdruckverlauf über den Zylindergröße gestützt,
der diese Versuchen entnommen ist. In der ersten Abbildung, die Herr Kamm zeigte,
war der zukünftige Nutzdruck abhängig von der Zylindergröße aufgetragen. Er war al-
Verhältniswert angegeben. Nun erscheint es mir zweifelhaft, ob es möglich ist, die da-
mals gefundenen Werte, die sich im Mitteldruckbereich von etwa 11 kg/cm² und im
Bereich einer Kolbengeschwindigkeit von 11 m/s bewegen, verhältnismäßig auf den lie-
genden Stand zu übertragen, wo beide Größen mindestens den Wert 14 besitzen. Es erscheint
mir weiterhin auch nicht gerechtfertigt, jene Grundlagen, die an geometrisch ähnlichen
Zylindern gefunden wurden, auf die Praxis zu übertragen, und zwar deshalb nicht, weil
in der Praxis Zylinder verschiedener Größe selbstverständlich nicht geometrisch ähnlich
gebaut werden. Die an sich geringere Ausnutzungsmöglichkeit größerer Zylinder verlangt
vom Konstrukteur, daß er Gegenmittel einsetzt, und diese Gegenmittel stehen ihm zur
Verfügung. Es ist am großen Zylinder viel leichter, auf konstruktivem Wege solche Gegen-
mittel gegen übermäßige Wärmebelastung anzuwenden als beim kleinen Zylinder. Ein
Beispiel ist der luftgekühlte Motor, auf dessen Außenfläche sich eine Verrippung mit
gegebenen Rippen-Abmessungen auf größerem Zylinder-Durchmesser verhältnismäßig
reichlicher anordnen läßt als beim kleinen Zylinder. Wenn man auch das Verdichtungs-
verhältnis beim kleinen Zylinder steigern kann, so stößt man doch bei der Anordnung
der Zündkerzen sofort auf Schwierigkeiten, weil beim kleinen Zylinder der Raum
für die Zündkerzen, die nun einmal in allen Fällen 14 mm Durchmesser haben, nicht
ausreicht. Diese und ähnliche Umstände waren Anlaß, daß wir in der DVL bei Erörte-
rungen ähnlicher Art, wie sie Herr Kamm durchgeführt hat, nicht den Mut besaßen,
den Nutzdruck und die Leistungsbelastung bei kleineren Zylindergrößen höher anzu-
setzen als bei den bewährten Größen von 3 l; wir konnten dies der Praxis gegenüber
nicht verantworten. Wir haben infolgedessen den effektiven Nutzdruck und erst recht
die Leistungsbelastung der Kolbenfläche für alle Zylindergrößen konstant gesetzt. Tut
man dieses — im übrigen unter Beibehaltung der Rechenmethoden von Herrn
Kamm —, dann stellt sich heraus, daß die ausgesprochenen Optima des Leistungsgewichts,
die Herr Kamm im Bereich kleiner Zylinder gezeigt hat, sich außerordentlich verflachen
und daß das Leistungsgewicht über dem gesamten Größenbereich zwischen etwa 1,0 l
bis 3 l Zylinderinhalt praktisch konstant wird. Dieses Rechenergebnis stimmt mit dem
überein, das Herr Christian mit seinen praktischen Untersuchungen gefunden hat.

Pier: Ich möchte nochmals auf das hinweisen, was Herr v. Philippovich vorhin
sagte. Wir haben zur Zeit vorwiegend aromatische Hochleistungskraftstoffe, die bei
guter und gleichmäßiger Kühlung der Zylinder eine besonders hohe Motorleistung
ermöglichen, jedoch gegen örtliche Überhitzungen empfindlich sind. Mit der fortwäh-

haben, Leistung, Drehmoment der Motoren nach Erreichen des Nennwertes, also des Enddrehmomentes, ablesend, war sicher Schwere, wenn die bei Versuchsdurchführung von einer Reihe der kleinen Zylinder her, nicht schon bei den ersten Versuchsleistungen festgestellt wurde, daß sich beim kleinsten Zylinder kein Leistungs- und Drehmomentvermögen enthalten hätte, das seinen je nach dem in den bisherigen Versuchsleistungen. Es ist schade, daß die bisherigen Versuche nur mit einer Erprobung durchgeführt werden und noch nicht mit Hochleistungskraftstoffen. Die Unterschiede in der Leistung zwischen kleinen und großen Zylindern werden bei Anwendung von optimalen Hochleistungskraftstoffen noch ganz bedeutend stärker, als sie bei den Untersuchungen von Herrn Kamm zugrunde gelegt wurden.

Kamm: Meine Herren, es ist sehr schade, daß Herr Caroselli nicht den Mut hatte, den kleineren Zylinder mit höherem Nutzdruk zu belasten als den großen. Wenn er es getan hätte, wäre er wahrscheinlich zu Ergebnissen gekommen, die mit unseren Untersuchungen genau übereinstimmen, soweit das bei solchen Vergleichen überhaupt möglich ist. Wenn wir unsere Vergleichsversuche vor Jahren durchgeführt haben zu Zylindern, die heute nicht mehr ganz modern sind, dann werden wir diese Versuche auch jetzt mit den gleichen Ergebnissen wiederholen können, und zwar bei geometrisch ähnlich gebauten Zylindern, das ist die Voraussetzung. Ich bin überzeugt, daß Abweichungen sich nur mit einigen Prozenten ergeben würden. Das Grundsätzliche, das wir damals feststellen konnten, ist auch heute noch gültig, einige Prozente hin oder her sind nicht wesentlich.

Die Ausführungen des Herrn Christian lassen es mir erforderlich erscheinen, die Aufmerksamkeit darauf zu richten, daß nur Vergleichbares miteinander verglichen wird. Wir haben seinerzeit unter großen Schwierigkeiten geometrisch ähnliche Zylinder in verschiedener Größe gebaut, um auf eine Vergleichsgrundlage zu kommen, denn früher hatten wir immer Motoren zur Hand, die sich nicht miteinander vergleichen ließen. Auch Herr Christian vergleicht seinen 12-Zylinder-V-Motor mit dem Sternmotor BMW 801 und seinen Doppelmotor mit dem DR 601.

Christian: Der 801 hat den geometrisch ähnlichen Zylinder wie der 411.

Kamm: Der Vergleichsmaßstab ist hier nicht gegeben, denn Herr Christian vergleicht ganze Motoren und müßte dazu Motoren haben, die nicht allein in der Zylinderbauart ähnlich, sondern in der gesamten Motorbauart vergleichbar sind. Es ist durchaus möglich, daß die Vollkommenheit der technischen Entwicklung der verglichenen Motoren verschieden ist. Die Abbildung 6 meines Vortrags, die auf eine Anregung des Herrn Steigenberger entstanden ist, zeigt, daß die ausgeführten gleichartigen Motoren zugeordneten Punkte sich einer Linie anzunähern versuchen. Würden sie auf dieser Linie liegen, dann könnte man die Motoren als vollkommen entwickelt ansehen. Jeder Motorenbauer hat eine mehr oder weniger vollkommene Lösung verwirklicht, so daß auch dadurch die Vergleichsgrundlagen verschoben werden. Die Vergleiche, die meinen Ausführungen zugrunde liegen, sind in jahrelanger Arbeit so vorsichtig angestellt worden, daß die Ergebnisse, als zuverlässig, hingenommen werden können.

Nach den von Herrn Pier genannten Gesichtspunkten konnten die Versuche nicht angestellt werden, denn damals waren die Höchstleistungs-Treibstoffe der heutigen Art nicht verfügbar. Wir sind auch darauf ausgegangen, einen Beitrag zur Entwicklung zu

hefen in der Richtung, daß die Motoren von den hohen Beanspruchungen zurück-
gebracht werden auf Beanspruchungen, die einen Betrieb ermöglichen, der den Einsatz
an der Front mit Überholungszeiten gestattet, wie sie heute leider nicht erreicht werden
kann. Es ist für die Forschung zwar schwer, Erfahrungsunterlagen zu bekommen, und sie
sollte in diesem Bemühen Unterstützung finden, dochwieweil wir, daß die hohe Be-
lastung der Motoren, die heute notgedrungen angewandt werden muß, an der Front
keine reine Freude anlockt, weil in vielen Fällen beim Einsatz Pausen gemacht werden
müssen, weil die Motoren in Überholung stehen. Das Ziel ist aber erreichbar, noch
höhere Leistungen mit nicht höheren Leistungsgewichten und nicht größerem Bauvolumen
mit Beanspruchungen zu verwirklichen, die es ermöglichen, die Flugmotoren mit Über-
holungszeiten einzusetzen, die denen der Kraftfahrzeuge nahekommen.

Eröffnung der Arbeitstagung über Verbrennungsfragen

E. Schmidt: Meine Herren, ich eröffne die Arbeitstagung über Verbrennungsfragen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung und heiße Sie herzlich willkommen. Die Akademie hat, wie Sie wissen, ihre Arbeit auf diesem Fachgebiet vor zwei Jahren, im Mai 1939, mit einer großen öffentlichen Arbeitstagung begonnen, an der die meisten von Ihnen teilgenommen haben. Im vorigen Jahr, nach Ausbruch des Krieges, haben wir nur eine Sitzung im engeren Rahmen veranstaltet, bei der im wesentlichen ein Überblick gegeben wurde über die Arbeitsmöglichkeiten der verschiedenen Institute und die dort angelaufenen Arbeiten. In diesem Jahr hielten wir es für zweckmäßig, eine Arbeitstagung in etwas größerem Rahmen anzusetzen, aber wir haben den Kreis doch noch so klein gehalten, daß die persönliche Fühlungnahme und eine echte, aus dem Augenblick heraus geborene Diskussion möglich sind. Wie Sie aus der Tagesordnung sehen, ist eine Reihe von Vorträgen über das Gebiet der Verbrennung und im besonderen über den Mechanismus des Verbrennungsvorganges, über die Reaktionsverhältnisse bei der Verbrennung vorgesehen, die ein Bild über die Arbeiten geben, die in den verschiedenen auf diesem Gebiet tätigen Instituten im letzten Jahr durchgeführt wurden. Wir wollen uns über diese Dinge nach den Vorträgen weiter aussprechen.