

# Beitrag zur Entwicklung starker Motoreinheiten

Von Wunibald Kamm

(Auszug)

Der Kriegseinsatz stellt an die Geschwindigkeit und Beförderungslleistung der Flugzeuge wachsende Forderungen. Zu ihrer Erfüllung ist eine wesentliche Erhöhung der Vortriebsleistung notwendig. Der vorhandene ausgereifte Kolbenmotor wird zunächst der Hauptträger des Einsatzes und der Entwicklung bleiben. Seine Ausschöpfung bis an die ihm wirklich gezogenen, heute aber noch nicht abschbaren Grenzen ist eine Rüstungsnotwendigkeit.

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 einige wesentliche Grundlagen ihrer Ausbildung völlig einig. 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 unter Herausschälung der wichtigsten Gesetzmäßigkeiten so darzulegen, daß klare Überlegung in diesen Unterlagen den Weg zur zweckmäßigsten praktischen Gestaltung zu finden vermag.

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

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

Die weiteren einzelnen Untersuchungen seien auf das Viertaktverfahren beschränkt.

Eine Steigerung der mittleren Kolbengeschwindigkeit stehen entgegen. Die Verminderung des Ladegrads infolge der zunehmenden Strömungsverluste, die durch Einführung von Schiebersteuerungen noch

um ein gewisses Maß abzumildern ist, das Anwachsen der Lagerdrücke durch die stark vermehrten Massenkräfte, die Verminderung der Nutzleistung wegen der ansteigenden Reibungsleistung und damit im 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 eine Erhöhung des Verdichtungsgrads, d. h. durch Verbesserung der thermischen Ausnutzung. 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 Verhältniszahlen 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

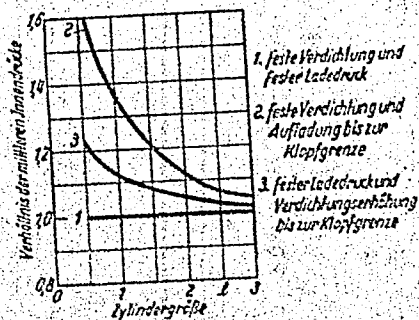


Abb. 1

Verhältnis der mittleren Innendrucke abhängig von der Zylindergröße

die Verdichtung festgehalten und der Ladedruck bis zur Erreichung der Klopfgrenze erhöht, so ergibt der kleinere Zylinder wesentlich höhere 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 angetriebenen 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 unsteigenden 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 beruhen, die in Abbildung 2 über der Zylindergröße 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/cm<sup>2</sup> je nach der Zylindergröße. Höhere Mitteldrücke werden z. T. bei Versuchsentwick-

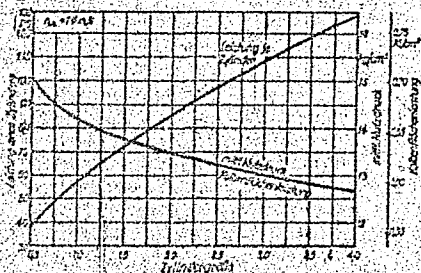


Abb. 2

Mitteldruck, Kolbenflächenleistung und Einzylinderleistung an der Klopfgrenze

lungen angewandt, z. T. bei Planungen eingesetzt. Die »Züchtung« der Motoren zu hohen Kolbenflächenleistungen ist zwar eine Forderung des technischen Fortschritts, wohlabgewogene Begrenzung der Mitteldrücke und Kolbengeschwindigkeiten beim Einsatz aber ein Gebot der Sicherheit und Bereitschaft.

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  $c_m = 14 \text{ m/s}$  und  $p_{me} = 12,5$  bis  $15 \text{ kg/cm}^2$  ergibt sich für die Kolbenflächenleistung ein Wert von  $0,6 \text{ PS/cm}^2$  für die größeren und von  $0,7 \text{ PS/cm}^2$  für die kleineren Zylinder. (Abbildung 2). Diese Werte sind heute bereits teilweise überschritten. In absehbarer Zeit dürfte eine Steigerung auf  $0,9 \text{ PS/cm}^2$  möglich sein.

Rechnet man zunächst für alle Zylindergrößen mit einem Mittelwert von  $0,65 \text{ PS/cm}^2$ , 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 des Zylinders von kleinem Durchmesser ebenfalls kleiner wird. Bemerkenswert ist ferner, daß aus diesem Grund auch für die Leistungsausnutzung des Hubraums 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.

Legt man nunmehr der dabei immer noch bei niedrigen Betriebsbeanspruchungen bleibenden 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 Zylindergrößen und Nutzleistungen. Für eine Nutzleistung von  $1000 \text{ PS}$  ergibt sich z. B. bei Verwendung von 3-1-Zylindern, die bei Triebwerken mit höheren Zylind-

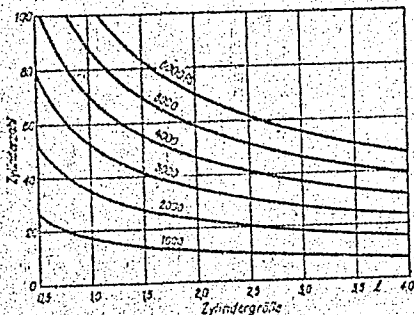


Abb. 3

Zylinderzahl und Zylindergröße für verschiedene Leistungen

derzahlen 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 gehauten Zylindern nimmt das auf die Kolbenflächeneinheit bezogene Gewicht, das Kolbenflächengewicht, das den linearen Abmessungen verhältig ist, bei kleineren Durchmessern ab. Da eine vorgeschriebene Gesamtleistung bei derselben Kolbenflächeneinheit 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 Bensing und Denkmeier durchgeführten konstruktiven Untersuchungen an Boxer-

motoren, 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 Kolbenflächenleistung annimmt. Dies bedeutet, daß auch der vielzylinderige Motor sich nicht schwerer baut und zunächst dasselbe Leistungsgewicht wie der Motor mit großen Zylindern ergibt.

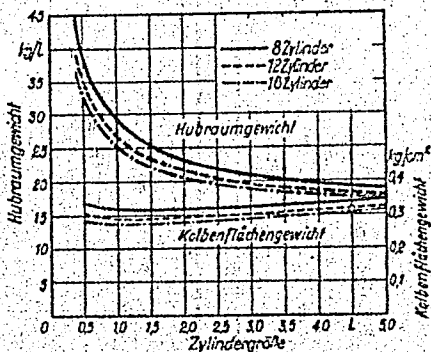


Abb. 4

Hubraum- und Kolbenflächengewicht  
(nach W. D. Bendinger und H. Drakowier)

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 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 Best-

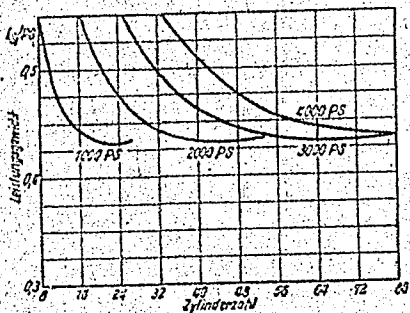


Abb. 5

Leistungsgewicht abhängig von der Zylinderzahl

werts macht sich der Einfluß der schlechteren Leistungsausbeute des größeren Zylinders und oberhalb der steile Anstieg des Hubraumgewichts bei sehr kleinen Zylindern geltend.

Bei der Wahl der Zylinderanordnung spielt die Stirnflächenleistung, d. h. die je  $m^2$  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 [5] die in Abbildung 6 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 hintereinandergeschaltet werden müssen.

Die Bauraumaussnutzung wird durch die Bauraumleistung, d. h. die Leistungsausbeute für  $1 m^3$  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 7 ebenfalls für die Mehrsternbauweise zeigt, steigt die Leistungsausbeute je Bauraumeinheit mit abnehmender Zylindergröße. Sie ist bei gegebener Zylindergröße unabhängig von der Gesamtleistung.

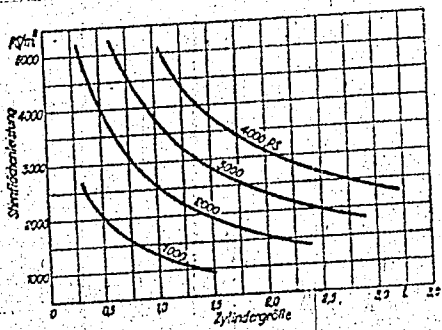


Abb. 6

Stirnflächenleistung von Mehrsternmotoren mit 7 Zylindern je Stern

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

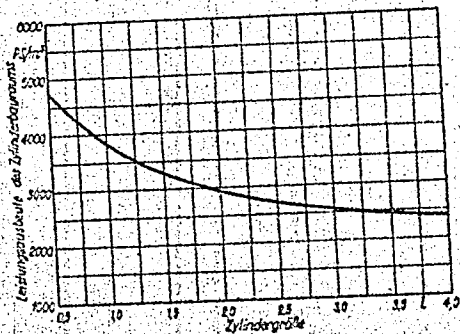


Abb. 7

Bauraumleistung von Mehrsternmotoren mit 7 Zylindern je Stern



die sich mit der niedrigeren Kolbenbelastung für 4000 PS ergaben. Trotz immer höherer Ausnutzung des Einzelzylinders ist also für die nächste Zeit mit Zylinderzahlen zu rechnen, die eine Prüfung der Möglichkeiten zu ihrer Unterbringung notwendig machen.

Die Anordnung der Zylinder kann grundsätzlich auf zweierlei Weise vorgenommen werden, in der bisher vorwiegend benutzten Einwellenbauweise und in der 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 Zusammenhang 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 Lager 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 abschbare Zeit mit einzelstehenden Zylindern ausführen wird, fällt die versteifende Wirkung des Zylinderblocks fort, so daß sich hier die Schwierigkeiten in erhöhtem Maße geltend machen. Die Schaffung ausreichender Kühlluftquerschnitte macht bei luftgekühlten Motoren weiter die Anwendung großer Schubstangenverhältnissen notwendig, was zwar etwas steifere Gehäuse ergibt, dafür aber gewichts- und kräftemäßig wieder ungünstig ist.

Als wesentlich wird im allgemeinen die Vergrößerung der Störungsempfindlichkeit 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 Leistungsabgabe in Kauf genommen werden, was für die weitere Leistungssteigerung nachteilig ist.

Diese aus der Zusammenfassung vieler, auf eine Welle arbeitender Zylinder entstehenden grundsätzlichen Schwierigkeiten weisen den Weg zur Aufstellung 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 auf mehrere Kurbelwellen verteilen, sind die Beanspruchungen von Wellen, Lagern und Gehäuse entsprechend geringer als bei der Einwellenbauweise. Durch Verwendung bewährter Baugruppen für die Teilmotoren lassen sich die sonst mit Neuentwicklungen verbundenen Schwierigkeiten auf ein Mindestmaß beschränken. Da die Teilmotoren völlig selbständige Triebwerkeinheiten bilden, ist es mit verhältnismäßig einfachen 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 Luftschaube.

Der zweite Weg ist nur für den Reihenmotor günstig beschreibbar. Als Vertreter dieser Bauweise ist der H-Motor zu nennen. Die Leistungsübertragung von den Teilmotoren auf die Luftschaubenwelle 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 bekannt gewordenen Bauarten von Gruppenmotoren sind 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 37 Hubraum greifen und die sich daraus für Gewicht und Raumbedarf ergebenden Nachteile in Kauf nehmen.

Sowohl bei der Einwellen- als auch bei der Zweiwellenbauweise ist der Konstrukteur demnach gezwungen, mit der Kolbenflächenleistung und mit der Zylindergröße bis hart an die Grenze zu gehen und die dadurch bedingte Beeinträchtigung der Betriebssicherheit und Lebensdauer in Kauf zu nehmen, wenn er die heute verlangten hohen Leistungen erzielen will. Das Problem weiterer Leistungsteigerung läuft also auf die Aufgabe hinaus, Anordnungen mit mehr als zwei Kurbelwellen zu schaffen, die die zu stellenden Anforderungen möglichst vollkommen erfüllen.

Von den beiden Entwicklungsmöglichkeiten der Mehrwellenbauweise, der Hintereinander- und der Nebeneinanderanordnung der Kurbelwellen, dürfte die erste kaum zu einem organisch ausgewogenen, einheitlichen Triebwerk führen. Ihre Anwendung ist daher als Nottlösung zu betrachten, die berechtigt ist, solange es keine zweckmäßigeren Lösungen gibt. Die Erfüllung der Forderungen einer nicht mehr fernen Zukunft ist aber in erster Linie von Triebwerken mit mehr als zwei nebeneinander angeordneten Wellen zu erwarten. Diese Bauweise, deren Verwirklichung angesichts der Möglichkeit der Herabsetzung der auftretenden Beanspruchungen gegenüber den bekannten Bauarten sowie der Verwendung nur bewährter Bauteile keine unüberbrückbaren Schwierigkeiten bietet, dürfte berufen sein, der Weiterentwicklung des starken Flugtriebwerks auf lange Sicht ihr Gepräge zu geben.

### Schrifttum

- [1] W. D. Bessinger: Flugmotoren mit Leistungen über 2000 PS. Techn. Ber. Bd 9 (1942) H. 2, S. 57.
- [2] J. Scatras: Kolbentriebwerkeinheiten von 1000 PS. Luftwiss. Bd 9 (1942) Nr. 7 S. 210 und Nr. 8, S. 234.
- [3] P. Bickert und A. Held: Leistung und Wärmeabfuhr bei geometrisch ähnlichen Zylindern. Jb. 1933 d. Dt. Luftfahrtforschg II S. 80.
- [4] H. Kuhn: Der Einfluß der Zylinderbaugröße auf die motorischen Kennwerte und die Baugewichte. Diss. Stuttgart: 1939.
- [5] W. Krantzer: Ausdehnungs- und Verformungsmaßnahmen vielsylindriger Sternmotoren auf Grund der Luftkühlungsbedingungen. Jb. 1932 d. Dt. Luftfahrtforschg II S. 313.