

## Über Bewertung und fortschrittliche Gestaltung von Kolbenflugmotoren

Von Wunibald Kamm

Vor längerer Zeit hat sich der Verfasser dieser Mitteilung in Schrift<sup>1)</sup> und Wort dafür eingesetzt, daß zur Erzielung hoher Betriebssicherheit von Flugmotoren die Motoren in der Versuchsentwicklung zu möglichst hohen Leistungen gezüchtet werden, im praktischen Einsatz aber Leistungen angewandt werden sollen, die von diesen hohen Leistungen so stark abgesetzt sind, daß die Beanspruchungen mäßig und sicher übersehbar sein werden.

Die Folgezeit hat zwar die Richtigkeit dieses Grundsatzes bestätigt, denn einerseits sind die Flugmotoren zu immer höheren Spitzenleistungen entwickelt worden, andererseits sind sie, wenigstens im Luftverkehr, mit Dauerleistungen betrieben worden, die wenig mehr als die Hälfte der Höchstleistungen betragen. Doch sind einer klaren Herausschälung und allgemeinen Befolgung dieses Grundsatzes immer wieder Schwierigkeiten begegnet, die besonders in der Notwendigkeit begründet waren, die Flugmotoren im Kriegseinsatz auch auf längere Flugdauer mit Leistungen zu betreiben, die sich den Höchstleistungen stärker annäherten, und außerdem die Höchstleistungen mit allen Mitteln weiter zu steigern.

Das Ergebnis sind hohe Anfälligkeit der Motoren für Störungen, hohe Empfindlichkeit in der Bedienung, hohe Ansprüche an die Wartung und ein unverhältnismäßig hoher Einsatz von Arbeitskräften in der Konstruktion und der Versuchsprobung zur laufenden Überwindung der bei diesen hohen Leistungen immer wieder auftretenden Schwierigkeiten, sowie starke Beeinträchtigungen der laufenden Herstellung mit schweren Folgen für die Ausbringung bei Auftreten von Störungen, die sich erst nach bestimmten Betriebszeiten oder unter der Einwirkung der durch die Großherstellung bedingten Umstände gezeigt haben.

<sup>1)</sup> Vgl. etwa W. Kamm, Jb. dt. Vers.-Anst. Luftf. (1930) S. 265.

Noch sind aber Möglichkeiten gegeben, auf längere Entwicklungszeit hinaus die Motoren so zu gestalten, daß sie unter sprunghafter Vergrößerung der auf den Einbauraum bezogenen Leistungen mit Betriebsleistungen eingesetzt werden können, die mit der nötigen Sicherheitsspanne von den Höchstleistungen abgesetzt sind; damit lassen sich Betriebssicherheit, Wartungsunempfindlichkeit und Festigkeit gegenüber Störungen der Serienherstellung erreichen, wie sie für den Kriegseinsatz notwendig sind.

Nur langsam bereitet sich im Kreise der Motorenfachleute die Erkenntnis über die durch die Ähnlichkeitsgesetze gegebenen mechanischen Zusammenhänge Bahn, die den Weg für solche Entwicklungen weisen. In mehrfachen Ausführungen vor der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung<sup>1)</sup> habe ich im Zusammenhang mit den Arbeiten meines Instituts, die sich auf die Pflege der Grundlagen des Triebwerks mit großer Zylinderzahl bei verkleinerten Zylinderabmessungen erstrecken, darauf hingewiesen, daß die Vergrößerung der Zylinderzahl bei Verkleinerung der Zylinderabmessungen die Grundlage dafür ist, höchste auf den Hubraum und damit auf den Einbauraum bezogene Leistungen bei mäßigen Beanspruchungen zu erzielen. Diese Ausführungen fanden z. T. lebhaften Widerspruch, der sich auf Versuchsergebnisse stützte, die diese Regel als nicht zutreffend erscheinen ließen, wobei aber die notwendige Sicherheit der Vergleichsgrundlage nicht gegeben war. Versuche meines Instituts mit einer Reihe geometrisch ähnlicher Zylinder, die schon vor Jahren die Richtigkeit dieser Zusammenhänge erwiesen haben, sind als mit nicht der neuesten Entwicklung entsprechend hohen Leistungsbelastungen durchgeführt nicht voll anerkannt worden. Von neueren Hochleistungsversuchen, die im Gange sind, können aber, wie aus diesen Ausführungen noch zu entnehmen sein wird, andere Ergebnisse nicht erwartet werden.

Kürzlich hat Steigenberger<sup>2)</sup> diese Zusammenhänge wieder aufgenommen und begründet noch einmal die Zweckmäßigkeit der Betrachtung der Belastung eines Motors mit Hilfe des bekannten, von G. Madelung, meinen Mitarbeitern und mir<sup>3)</sup> mehrfach empfohlenen Begriffs der Kol-

<sup>1)</sup> W. Kamm, Ergebnisse von Versuchen mit geometrisch ähnlich gebauten Zylindern verschiedener Größe und Folgerungen für die Flugmotorenentwicklung, Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg., H. 12 (1939).

W. Kamm, Beitrag zur Entwicklung starker Motoreinheiten, Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg., H. 1056/42 g.

<sup>2)</sup> O. Steigenberger, Motortechn. Zs., Bd 5 (1943) S. 361.

<sup>3)</sup> W. Kamm, Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg., H. 1056/42 g.

P. Riekerf, Luftf.-Forschg., Bd 20 (1943) S. 99.

benflächenleistung und stellt eine Wertungsgröße dar, welche neben  $N$  auf mit der auf das Leistungsgewicht bezogenen höchsten Leistung  $G$ ...

$$\frac{N}{G} \cdot \frac{G}{F}$$

die die größte spezifische Leistungsausbeute bei geringstem Gewicht wertet, sowie die weitere Bewertungsgröße

$$\frac{N}{F} \cdot \frac{G}{F}$$

die das schon mehrfach als Kenngröße benutzte Kolbenflächengewicht, d. h. das auf die Einheit der Kolbenfläche bezogene Baugewicht des Motors wertet.

Er vergleicht und beurteilt die Motoren nach der ersteren Wertungsgröße

$$\frac{N}{FG}$$

die er eine Gütezahl nennt. Diese Zahl stellt eine Kennziffer für die Leistungsahnützung der Motoren dar, die das Ergebnis dessen umfaßt, was ich oben mit »Züchtung« bezeichnet habe.

Es liegt aber nahe, die Güte eines Flugmotors nicht nach der spezifischen Höchstleistung allein zu beurteilen, sondern nach seiner Gesamtbewährung, die neben den Betriebsleistungen sein übriges Verhalten, also z. B. die Betriebssicherheit, die Unempfindlichkeit, die Seriensicherheit, mit umfaßt. Diese letzteren Eigenschaften sind aber, unter der Voraussetzung von Konstruktionen, die so vollkommen sind, wie es dem Stand der Technik entsprechen kann, bedingt durch die Beanspruchungen, unter denen der Motor in seinen einzelnen Teilen arbeitet. Über die Belastungen kann man sich aber leicht rechnerisch zahlenmäßig Klarheit verschaffen, und die unter diesen Belastungen wirkenden Beanspruchungen kann man auf Grund von Versuchsergebnissen beurteilen.

Die Kenngrößen der Motoren, mit denen der Motorenbauer vertraut ist, sind folgende:

Leistung	$N$	PS
mittlerer Arbeitsdruck	$p_m$	kg/cm <sup>2</sup>
mittlere Kolbengeschwindigkeit	$c_m$	m/s
Gesamtkolbenfläche	$F$	m <sup>2</sup>
Einzelkolbenfläche	$f$	m <sup>2</sup>
Gesamthubraum	$V_h$	m <sup>3</sup>
Hubraum des Zylinders	$V_{h_1}$	m <sup>3</sup>

Zylinderzahl		
Kolbenflächenleistung	$N$	
Bohrung	$d$	
Hub	$s$	
Drehzahl	$n$	
Gewicht des Einzelschwerers	$G_1$	
Gewicht des Gesamtriebwerks	$G_2$	
Kolbenflächenleistung	$N$	

Von diesen Größen sind der mittlere Arbeitsdruck  $p_m$  und die Kolbengeschwindigkeit  $c_m$  diejenigen, die die Belastung des Motors in thermischer und mechanischer Hinsicht kennzeichnen. Ihr Produkt in der Form

$$\frac{p_m \cdot c_m}{300} = \frac{N}{F}$$

ist die erwähnte Kolbenflächenleistung beim einfach wirkenden Viertaktmotor, die insgesamt ein Maß für die Belastung des Motors darstellt. Es ist nun wissenswert, für eine feste Größe von  $N/F$ , also für eine bestimmten Betriebsbedingungen angepaßte Kolbenflächenleistung, Vergleiche für die gegenseitige Abhängigkeit der übrigen Größen anzustellen, und zwar für drei Fälle.

**1. Fall:**

Der Gesamthubraum  $V_h$  bleibt unverändert; verändert wird die Zylinderzahl, und abhängig von dieser Zylinderzahl ändern sich die Leistung  $N$ , die Gesamtkolbenfläche  $F$ , die Einzelkolbenfläche  $f$ , der Einzelzylinderhubraum  $V_{h_1}$ , die Bohrung  $d$ , der Hub  $s$  und die Drehzahl  $n$ .

**2. Fall:**

Die Leistung  $N$  bleibt unverändert; verändert wird die Zylinderzahl  $z$ , abhängig von dieser Zylinderzahl ändern sich der Gesamthubraum  $V_h$ , die Einzelkolbenfläche  $f$ , der Einzelzylinderhubraum  $V_{h_1}$ , die Bohrung  $d$ , der Hub  $s$ , die Drehzahl  $n$ .

**3. Fall:**

Die Zylinderzahl  $z$  liegt fest; verändert wird der Hubraum  $V_h$ ; in Abhängigkeit von  $V_h$  ändern sich die Leistung  $N$ , die Gesamtkolbenfläche  $F$ , die Einzelkolbenfläche  $f$ , der Einzelzylinderhubraum  $V_{h_1}$ , die Bohrung  $d$ , der Hub  $s$  und die Drehzahl  $n$ .

Die mittlere Kurbelgeschwindigkeit  $c_m$  ist durch die Drehzahl  $n$  und den Hub  $s$  gegeben, so daß die mittlere Kurbelgeschwindigkeit  $c_m$  mit  $n$  und  $s$  durch die Gleichung

$$c_m = \frac{\pi}{4} n s$$

mit der Zylinderhöhe  $z$  und dem Bohrungsdurchmesser  $d$  durch die Gleichung

$$s = z - d$$

Mit der Zylinderbohrung  $d$  wird

$$s = z - d \quad (1)$$

Nun ist aber der Gesamthohlraum

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 z$$

Das Verhältnis zwischen Hub und Bohrung hat sich im Verlaufe der Entwicklung als praktisch gleichbleibend und als vorteilhaft mit ungefähr 1:1 erwiesen, so daß mit  $s/d = 1:1$  geschrieben werden kann:

$$s = d$$

Daraus ergibt sich für die Bohrung

$$d = \left( \frac{4}{\pi z} V \right)^{1/2}$$

und für die Einzelkolbenfläche

$$f = \frac{\pi}{4} d^2 = \left( \frac{\pi}{4} \right)^{1/2} z^{-1/2} V^{1/2}$$

Mit Einsetzen dieser Größe für  $\pi/4 \cdot d^2$  in die obige Leistungsformel ergibt sich

$$N = r \left( \frac{\pi}{4} \right)^{1/2} z^{-1/2} V_k^{3/2} n$$

Aus diesem Zusammenhang, und da die Drehzahl  $n$  wegen der als gleich angenommenen mittleren Kolbengeschwindigkeit  $c_m = \pi n/30$  umgekehrt verhältig dem Hub ist, der unter der gemachten Voraussetzung geometrischer Ähnlichkeit der Bohrung verhältig und mit dem Hubverhältnis 1:1 der Bohrung gleich ist, lassen sich mit einfachen Potenzrechnungen für die oben erwähnten drei Fälle des Vergleichs verschiedener Motoren bei festliegender Kolbenflächenleistung folgende Ergebnisse ableiten.

1. Fall:

$$\begin{aligned}
 V_h &= \text{const.} \\
 N &= r \left( \frac{\pi}{4} \right) z^2 = \text{const.} z^2 \\
 F &= \text{const.} z^3 \\
 f &= \text{const.} z^4 \\
 V_{h_2} &= \text{const.} z^5 \\
 d &= \text{const.} z^6 \\
 s &= \text{const.} z^7 \\
 n &= \text{const.} z^8
 \end{aligned}$$

2. Fall:

$$\begin{aligned}
 N &= \text{const.} \\
 F &= \text{const.} \\
 V_h &= N \cdot r \left( \frac{\pi}{4} \right) z^2 = \text{const.} z^2 \\
 f &= \text{const.} z^3 \\
 V_{h_2} &= \text{const.} z^4 \\
 d &= \text{const.} z^5 \\
 s &= \text{const.} z^6 \\
 n &= \text{const.} z^7
 \end{aligned}$$

3. Fall:

$$\begin{aligned}
 z &= \text{const.} \\
 N &= r \left( \frac{\pi}{4} \right) z^2 = V_h^{\frac{2}{3}} = \text{const.} V_h^{\frac{2}{3}} \\
 F &= \text{const.} V_h^{\frac{3}{3}} \\
 f &= \text{const.} V_h^{\frac{4}{3}} \\
 V_{h_2} &= \text{const.} V_h^{\frac{5}{3}} \\
 d &= \text{const.} V_h^{\frac{6}{3}} \\
 s &= \text{const.} V_h^{\frac{7}{3}} \\
 n &= \text{const.} V_h^{\frac{8}{3}}
 \end{aligned}$$

Zur Erleichterung der Abschätzung und Beurteilung ihres Einflusses auf die Gestaltung sind diese Potenzfunktionen in den Abbildungen 1 bis 3 als Übersicht dargestellt. (Die in den Abbildungen eingetragenen Werte sind durchweg Verhältniswerte, wobei der Maßstab jeweils so gewählt ist, daß bei dem Wert 1 der Abszissenwerte die Ordinatenwerte ebenfalls den Wert 1 annehmen.) •

Folgende bisher wenig bekannte Tatsachen sind aus diesen Zusammenhängen abzuleiten.

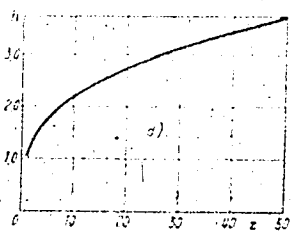
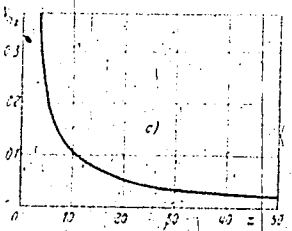
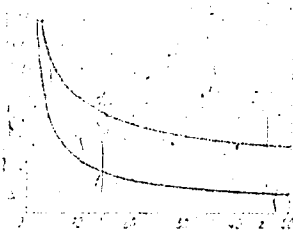
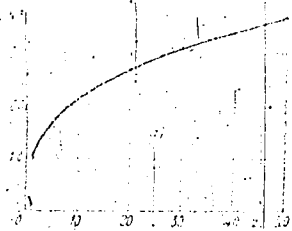


Abb. 1

Verlauf der Motorgrößen in Abhängigkeit von der Zylinderzahl  $z$  bei unverändertem Gesamthubraum  $V_h$  (1. Fall)

- a) Leistung  $N$ , Gesamtkolbenfläche  $F$
- b) Hubraum  $V_h$  des Einzelzylinders
- c) Bohrung  $d$ , Hub  $h$ , Einzelkolbenfläche  $f$
- d) Drehzahl  $n$

Wenn ein Motor mit gegebenem Gesamthubraum, der dem Einbauroum verhältnig ist, auf größere Zylinderzahlen umgebaut wird, so vergrößert sich bei unveränderter Belastung die Leistung mit der dritten Wurzel aus der Zylinderzahl. Wenn er also beispielsweise von 12 Zylindern auf 21 Zylinder umgebaut wird, so vergrößert sich die Leistung im Verhältnis  $\sqrt[3]{21/12} = 1,26$ fach, oder wenn er von 12 auf 48 Zylinder umgebaut wird, im Verhältnis  $\sqrt[3]{48/12} = 1,59$ fach. Die Bohrung  $d$  verkleinert sich verhältnig der dritten Wurzel aus der Zylinderzahl, wird also bei Verdoppelung der Zylinderzahl  $1/1,26 = 0,79$ fach und bei Vervielfachung der Zylinderzahl  $1/1,59 = 0,63$ fach. Mit diesen Verkleinerungen der Bohrung werden aber die thermischen Beanspruchungen, da die Wärmewege kürzer werden, stark vermindert, so daß die unveränderte Kolbenflächenleistung für den Motor mit kleinerer Bohrung eine zwar gleiche Belastung, aber eine stark verminderte Wärmebeanspruchung darstellt. Die Flächenbelastungen in den Lagern bleiben unverändert, denn die Lagerkräfte aus den Verbrennungsdrücken und aus den beweg-

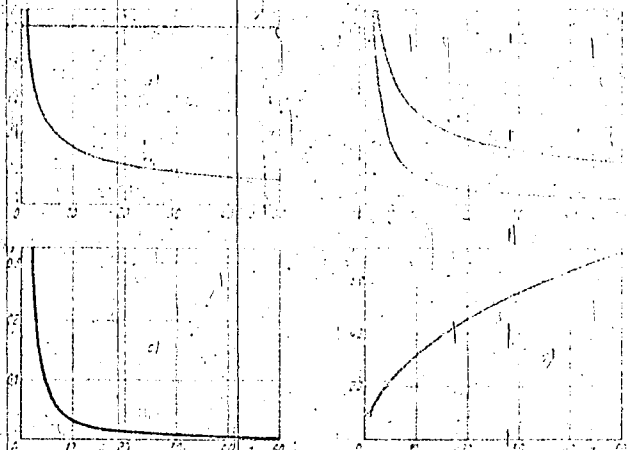


Abb. 2  
Verlauf der Motorkenngrößen in Abhängigkeit von der Zylinderzahl  $z$  bei unveränderter Gesamtleistung  $N$  (2. Fall)

- a) Gesamthubraum  $V_h$ , Gesamt-Kolbenfläche  $F$ , c) Hubraum  $V_h$  des Einzylinders, b) Bohrung  $d$ , Hub  $z$ , Einzel-Kolbenfläche  $f$ , d) Drehzahl  $n$

ten Massen ändern sich bei gleicher Kolbengeschwindigkeit mit dem Quadrat der linearen Abmessungen, also mit  $s^2$ , demnach mit  $z^{-2/3}$ . Die Flächen, die diese Kräfte aufzunehmen haben, ändern sich ebenfalls mit dem Quadrat der linearen Abmessungen, also mit  $z^{-2/3}$ , so daß das Verhältnis zwischen Kräften und Flächen unverändert bleibt.

Wenn ein Motor bei unveränderter Leistung auf höhere Zylinderzahl gebracht wird, so ändert sich sein Gesamthubraum im umgekehrten Verhältnis der Quadratwurzel aus der Zylinderzahl<sup>1)</sup>. Nach der Voraussetzung  $N/F = \text{const}$  ist dabei die Gesamt-Kolbenfläche aber umgekehrt verhältig der Zylinderzahl. Die Bohrung ist umgekehrt verhältig der Quadratwurzel aus der Zylinderzahl. Bei Verdoppelung der Zylinderzahl verkleinert sich also der Gesamthubraum auf den 0,7fachen Wert, bei Vervielfachung der Zylinderzahl auf den halben Wert, die Bohrung verkleinert sich bei doppelter Zylinderzahl ebenfalls auf den 0,7fachen Wert, bei Vervielfachung der Zylinderzahl auf den 0,5fachen Wert. In diesem Fall wird der mit  $V_h$  verhältig angenommene Bauaufwand

<sup>1)</sup> P. Rieckert, a. a. O.



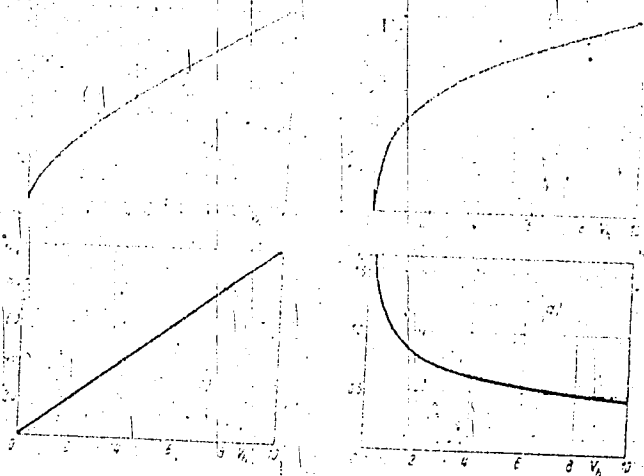


Abb. 3

Verlauf der Motor Kenngrößen in Abhängigkeit vom Gesamthubraum  $V_h$  bei unveränderter Zylinderzahl  $z = 3$  (Fall)

1. Leistung  $P$ , Gesamtkolbenfläche  $F$ , 2. Hubraum  $V_h$  des Einzelzylinders,  
 3. Hubraum  $d$ , Hub  $s$ , Einzelkolbenfläche  $f$ , 4. Drehzahl  $n$

des Motors kleiner, und die Wärmebeanspruchungen werden in noch höherem Maße kleiner als im 1. Fall. Der Grund liegt darin, daß im 1. Fall die Leistung mit der dritten Wurzel aus der Zylinderzahl zunimmt, während sie im vorliegenden Fall konstant bleibt.

Werden zwei Motoren mit gleicher Zylinderzahl gebaut, also nicht nur im Aufbau des Einzelzylinders, sondern im Gesamtaufbau geometrisch ähnlich vergrößert oder verkleinert, so ändert sich bei gleichen Belastungen die Leistung nicht etwa, wie sich aus der bisherigen fälschlichen Anwendung des Begriffes der Hubraumleistung ergeben würde, mit dem Hubraum  $V_h$ , sondern mit  $V_h^{2/3}$ . Wenn also beispielsweise zwei 12-Zylindermotoren entwickelt werden, der erste etwa mit 20 l Hubraum für eine Leistung von 800 PS und der zweite mit einem Hubraum von 30 l, so wird nicht, wie es bisher wohl im allgemeinen geschah, von dem zweiten Motor eine Leistung von 1200 PS zu erwarten sein, sondern nur eine Leistung von  $800 \cdot (30/20)^{2/3} = 800 \cdot 1,31 = 1050$  PS, sofern gleiche Belastung beibehalten werden soll; eine Vergrößerung des Hubraums um 50% ergibt also nur eine Leistungserhöhung von 31%. Aus dem Um-

stand, daß man bisher in diesem Fall eine dem Hubraum verhältnißige Leistungserhöhung erwartet hat, ergibt sich, daß der größere Motor stets mit einer höheren Kolbenflächeneistung belastet werden ist, womit die in solchen Fällen aufgetretene Erscheinung erklärbar ist, daß der kleinere Motor in seiner Betriebswärme nicht so leidet, wie der größere Motor und weniger Betriebschwierigkeiten mit sich zu bringen hat als dieser. Aber selbst bei der Beibehaltung der gleichen Kolbenflächeneistung, also bei Steigerung der Leistung im Verhältnis  $V$ , wird die Wärmebeanspruchung in diesem Fall größer, weil die Bohrung mit  $V$  zunimmt, womit die Wärmewege größer werden. Die Lagerbelastungen bleiben auch in diesem Fall, wenn  $V/F$  unverändert beibehalten wird unverändert.

Die Anwendung dieser einfachen Erkenntnisse eröffnet, wie oben behauptet und nun bewiesen ist, den Weg zur Entwicklung der Motoren zu weiteren Leistungssteigerungen unter gleichzeitiger Herabsetzung der Wärmebeanspruchungen, wenn man nur die den Kampfbedingungen entsprechenden genügend weitgehenden Entschlüsse für die Vermehrung der Zylinderzahl bei gleichzeitiger Verringerung der Zylinderabmessungen faßt, wobei es sehr darauf ankommen wird, nicht nur der Entwicklung des Feindes, die ja, z. B. mit dem englischen Motor Napier Sabre, diesen Weg schon eingeschlagen hat, nachzueifeln, sondern sie zu überholen und ihr gegenüber nochmal auf eine gewisse Dauer einen Vorsprung zu schaffen, bis zu dem Zeitpunkt, zu dem gleichartige Entwicklungen auf beiden Seiten wiederum zum praktischen Einsatz höchster Leistungsbelastungen zwingen würden. Heute sei jedoch dahingestellt, ob dieser letzte Schritt sich vollziehen wird, oder ob das Endergebnis der Entwicklung zu hohen Zylinderzahlen bei der Verwirklichung mäßig hoher Leistungen bei hoher Betriebssicherheit stehenbleiben wird. Denn durch diese Entwicklung zu hohen Zylinderzahlen lassen sich bei den in einer Flugzeugzelle praktisch zur Verfügung stehenden, durch die Kühlbedingungen weitgehend mit beeinflussten Einbauräumen Leistungen erzielen, die wiederum bis zum äußerst Erreichbaren zu steigern wohl kein Anlaß mehr sein wird, weil dann die Strahltriebwerke als Höchstleistungstriebwerke auf den Gebieten, auf denen sie ihre Bewährung nachgewiesen haben werden (und das werden zuerst die Anwendungsgebiete der Höchstleistung sein), den Kolbenmotor ersetzen können.

Wenn also im Sinne der obigen Ausführungen davon abgeraten wird, die »Güte« eines Motors nach seiner Höchstleistung zu beurteilen, sie vielmehr nach Leistung, Betriebssicherheit, Unempfindlichkeit und Serienfestigkeit zu bewerten, so wird neben der Steigenbergerschen Bewertungsziffer  $N^2/FG$ , die als Leistungsausnutzungsziffer oder als Züchtungsziffer bezeichnet werden könnte, die Wertungsziffer gesetzt werden

müssen, die die Vergrößerung von niedrigem Leistungsgewicht mit niedriger Belastung bewertet. Es muß dann das Produkt aus der Vergrößerung Leistungsgewicht und dem Verhältnis Kolbenfläche Leistung aus

$$G/F$$

darstellen. Diese Wertungsziffer verdeutlicht, daß im Sinne der Leistungsausbeute des Baugewichts und damit des Bauaufwands bei bestimmter Belastung der Motor den Vorzug verdient, der bei gegebenem Gewicht die größte Kolbenfläche und damit die höchste Leistung oder bei gegebener Kolbenfläche das geringste Gewicht aufweist.

Der reziproke Wert  $G/F$  ist als der schon oben genannte und auch von Steigenberger erwähnte Begriff Kolbenflächengewicht bekannt, so daß man unter Benützung dieses bekannten Begriffes sagen kann: ein Motor mit niedrigem Kolbenflächengewicht muß als hochwertiger Motor nicht nur hinsichtlich seines Baugewichts, sondern hinsichtlich der Leistungsausbeute des Baugewichts bei gewählten Betriebsbelastungen seiner Teile bezeichnet werden.

Bei geometrisch ähnlicher Bauweise der Einzeltriebwerke eines Motors läßt sich über das Kolbenflächengewicht  $G/F$  des Gesamtmotors noch folgende Betrachtung anstellen: Wird ein Einzeltriebwerk geometrisch ähnlich, bei gleichen Werkstoffen vergrößert, so wachsen Hubraum und Gewicht mit der dritten Potenz der linearen Abmessungen. Das Hubraumgewicht des Einzeltriebwerks  $G/V_h$  bleibt dann konstant, so daß für das Kolbenflächengewicht des aus  $z$  gleichartigen Einzeltriebwerken zusammengesetzten Gesamtmotors folgt

$$\delta \frac{G}{F} = z \frac{G_1}{F_1} \frac{V_{h_1}}{V_{h_2}} \frac{V_{h_2}}{V_{h_1}} = \text{const} \frac{V_{h_2}}{V_{h_1}} = \text{const} \frac{1}{f} = \text{const } s.$$

Somit ist das Kolbenflächengewicht völlig ähnlicher Motoren verhältig dem Hub, und zwar ohne Rücksicht darauf, ob der Vergleich auf Grund gleicher Hubräume, gleicher Leistungen oder gleicher Zylinderzahlen erfolgt. Bei gleicher Leistung wird demgemäß das Kolbenflächengewicht  $\delta$  mit steigenden Zylinderzahlen wegen des abnehmenden Hubes kleiner und daher günstiger werden. Wenn auch die geometrische Ähnlichkeit bei Vermehrung der Zylinderzahl sich nicht in allen Teilen, z. B. Gehäuse und Hilfsgeräte, durchführen läßt, so ist doch entgegen den Erwartungen mindestens keine Zunahme des Kolbenflächengewichts und damit auch keine Zunahme des Leistungsgewichts

$$\frac{G}{N} = \frac{F}{N} \frac{G}{F} = \text{const} \frac{G}{F}$$

festzustellen.

... die ...

... die ...

... die ...

Zusammenfassung

... die ...

Die Entwicklung des ...

... die ...

Diese Abhängigkeiten ...

... die ...

Das Verhältnis zwischen ...

... die ...

Der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung  
vorgelegt am 3. März 1914.