

Ermüdungsprobleme und Verschleisswirkungen im Verbrennungsmotorenbau

Autor(en): **Hablützel, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **75 (1957)**

Heft 24: **Sonderheft zum Internat. Verbrennungsmaschinenkongress Zürich 1957**

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-63373>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

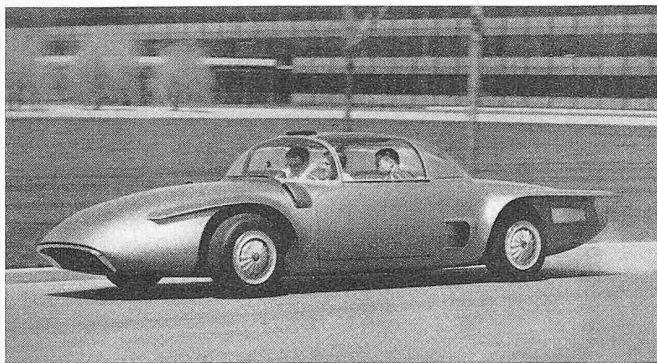


Bild 17. Versuchswagen XP-500 der General Motors Corporation mit Antrieb durch eine Freikolben-Generatoranlage

infolge der zu beschleunigenden rotierenden Massen schwer zu vermeidende Nachteile dieser Anwendung. Wird aber an Stelle des Rotationskompressors und der Verbrennungskammer ein Freikolbengenerator zu Lieferung der Gase verwendet, so sind diese Nachteile praktisch behoben.

Im Auftrag zweier bedeutender Automobilfabriken entwickelte die S. E. M. E. für den Personenauto- bzw. Lastwagenantrieb zwei Freikolbengeneratoren von 150 und 250 PS, die sich gegenwärtig im Versuchsstadium befinden. Der 250-PS-Generator ist eine Zwillingmaschine mit zwei Zylindern von 100 mm Bohrung, die in einem gemeinsamen, als Spül-luftaufnehmer dienenden Gehäuse eingebaut sind. Die Bewegung des einen Kolbenpaares ist durch eine pneumatische

Vorrichtung um 180° gegenüber dem des andern Generators versetzt. Durch die Zwillinganordnung wird ein etwas besserer Wirkungsgrad erreicht, indem gewisse Verluste, die vom Speichern der Spülluft herrühren, vermieden werden können. Während der Ausstossperiode der Kompressoren des einen Generators stehen die Spül- und Auslasschlitze des andern offen, so dass die Luft ungehindert durchströmen kann. Bei dieser Anordnung ist auch der Gasdurchsatz regelmässiger, so dass Druckausgleichbehälter zwischen Generator und Turbine nicht mehr notwendig sind. Bild 15 zeigt den Zwillingsgenerator, der in Amerika «Hyprex» genannt wird, und Bild 16 einen Schnitt quer durch die Maschinenmitte. Bei Vollast steigt die Schwingungszahl jedes der Generatoren auf 2400 pro Minute.

Der Freikolbengenerator ist im Vorderteil eines besonders für diese Anwendung erstellten Versuchswagens eingebaut; er liefert über eine im Chassisrahmen verlegte Leitung die Druckgase in die neben der Hinterachse angeordnete Turbine. Das Versuchsauto XP 500 (Bild 17) der General Motors Corporation wurde im Mai vergangenen Jahres anlässlich der Eröffnung des Technical Centers in Detroit der Öffentlichkeit vorgeführt.

Ein Freikolbengenerator dieser Leistung wird natürlich auch neben seiner Verwendung als Autoantrieb z. B. auf Baumaschinen aller Art wegen der vorzüglichen Drehmomentencharakteristik der Turbine ein weites Anwendungsgebiet finden, besonders da Freikolbengeneratoren, wie Versuche gezeigt haben, der Brennstoffqualität gegenüber weitgehend unempfindlich sind.

Adresse des Verfassers: Dipl. Ing. R. Huber, directeur de la Société d'Etudes Mécaniques et Energétiques, Avenue du Château de la Malmaison, Rueil-Malmaison (S et O), France.

Ermüdungsprobleme und Verschleisswirkungen im Verbrennungsmotorenbau

DK 621.43.004.6

Von Dipl. Ing. E. Hablützel, Professor am Technikum Winterthur

Die dauernd wechselnden und schwellenden Beanspruchungen von Rahmen, Deckeln, Triebwerkteilen und deren Verschraubungen, wie sie sich aus den zeitlich veränderlichen Gasdrücken im Zylinder und beim periodischen Verlauf der Massenkräfte von Verbrennungsmotoren ergeben, stellen an deren Formgebung und Dimensionierung ganz andere Anforderungen als ruhende oder selten wechselnde Lasten. Es können an festen Körpern mit vielfach wiederholter Beanspruchung Ermüdungserscheinungen in Form von Rissen und Brüchen auftreten, auch wenn die Nennspannung den für statische Belastung als zulässig angegebenen Wert nie überschritten oder nicht einmal erreicht hat. Unter der Nennspannung versteht man diejenige spezifische Beanspruchung, die durch festigkeitstheoretische Berechnungen ermittelt und über den Querschnitt gleichmässig oder linear verteilt gedacht wird.

Der Bericht Nr. 173 der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) in Zürich vom September 1950, gezeichnet von M. Roš und A. Eichinger, Zürich, auf den noch mehrfach Bezug genommen wird, gibt für diese Erscheinung die Erklärung, dass der feste Körper ein Erinnerungsvermögen für seine Vorgeschichte besitzt, so dass die zeitlich veränderliche Belastung zwar in der Regel als eine Folge statischer Beanspruchungen betrachtet werden kann, die aber nicht auf einen gleichbleibenden Körper wirken. Vielmehr liegt in jedem Augenblick ein anders gearteter oder veränderter fester Körper vor. Die Ermüdung ist demnach eine Folge irreversibler Vorgänge im Körper. Die Ermüdungsgrenze kann auch als Grenze der plastischen Verformung betrachtet werden, denn dieser geht eine Zerrüttung des kristallinen Gefüges voraus.

Im Falle rein elastischen Verhaltens erscheint somit das Ermüden eines festen Körpers als undenkbar. Darum sind innerhalb der Ermüdungsfestigkeit die beiden Formen der Zeitfestigkeit einerseits und der Dauerfestigkeit andererseits zu unterscheiden. Die Zeitfestigkeit bezeichnet die Spannungsgrenze, die zusammen mit der zugehörigen Lastwechselzahl zum Ermüdungsbruche führt, während mit der Dauerfestigkeit diejenige Grenzspannung erfasst wird, unterhalb welcher ein Bruch auch bei beliebig vielen Lastwechseln nicht mehr eintritt. Hat z. B. ein Maschinenelement aus einwandfreiem

Baustahl 1 bis 2 Millionen Lastspiele zwischen konstant bleibenden Belastungsgrenzen ohne Schaden überstanden, so tritt erfahrungsgemäss auch bei beliebig vielen weiteren Lastwechseln keine Ermüdungserscheinung ein, sofern die Beanspruchungen auch in Zukunft nicht höher werden und die Oberfläche des Werkstückes keine Veränderung erfährt. Die auftretenden Spannungen sind dann gleich oder kleiner als die Dauerfestigkeit. Im Gegensatz zu Gusseisen und Stahl haben Leichtmetalle keine Dauerfestigkeit, d. h. mit zunehmender Lastwechselzahl nimmt deren Festigkeit dauernd ab, so dass Leichtmetalle mit Wechselbeanspruchung auf alle Fälle eine beschränkte Lebensdauer haben.

Im beliebig geformten Konstruktionsteil ist die räumliche Spannungsverteilung rechnerisch kaum zu erfassen. Hingegen können mit Hilfe von Dehnungsmessungen oder an Modellen aus Kunststoffen nach der photoelastischen Methode die Stellen grösster Spannung ausfindig gemacht und unter gewissen Voraussetzungen diese Spannungen selber ermittelt werden. Der zitierte Bericht der EMPA sagt darüber aus: «Solange die Elastizitätsgrenze des Materials nirgends im Körper überschritten wird, liegt die Stelle der höchsten Beanspruchung in quasiisotropen und quasihomogenen festen Körpern, unabhängig von ihrer Gestalt, stets an einer äusseren oder inneren Oberfläche, sofern der Körper im Ausgangszustand frei von Eigenspannungen war. Dies kann grundlegend ändern, wenn die Elastizitätsgrenze überschritten wird, und zwar sowohl was die Stelle der Höchstspannung als auch diese selber anbetrifft. Darum ist es unmöglich, durch statische Versuche die sogenannte schwache Stelle einer Konstruktion für Wechselbeanspruchung zu finden.»

Der Lastwechsel unterstützt die plastische Verformung durch die sog. Zerrüttungsdehnung, was einen Abbau der Spannungsspitzen und einen Lastausgleich zur Folge hat. Darum kann auch ein Körper aus einwandfreiem Material selbst dann eine Dauerfestigkeit aufweisen, wenn anfänglich örtliche, plastische Verformungen auftraten. Auch gibt es in der Regel eine Grenzzahl von Belastungen über die Dauerfestigkeit hinaus, bis zu der keine Verminderung derselben eintritt, falls die Beanspruchung nach der Ueberlastung wieder auf die Höhe

der eigentlichen Ermüdungsfestigkeit herabgesetzt wird. Man nennt diese Zahl die Schädengrenze; sie ist abhängig vom Mass, um das die Dauerfestigkeit überschritten wird. Die Lebensdauer zeitweilig überbeanspruchter Maschinenteile ist weitgehend abhängig von dieser Schädengrenze.

Eine Dauerfestigkeit ist nicht nur auf bestimmte Konstruktionsmaterialien beschränkt. Vielmehr ist diese auch an eine einwandfreie Formgebung und an bestimmte Oberflächeneigenschaften gebunden. Bauteile mit scharfen Kerben oder andern Fehlern der Formgebung haben keine Dauerfestigkeit im eigentlichen Sinne, sondern eine beschränkte Lebensdauer, weil bei ihnen die noch erträgliche Spannung mit zunehmender Zahl der Lastspiele abnimmt. Das selbe gilt für Konstruktionsteile, die vor dem Betrieb der Korrosion unterlagen, vor allem aber ihr im Betriebe selber ausgesetzt sind, gleichgültig, ob es sich um einen rein chemischen Angriff oder um Reiboxydation in Presssitzen handle. Besonders gefährdet ist der Betrieb in korrodierenden Medien bei hoher Temperatur. Wo aus den genannten Gründen eine Dauerfestigkeit nicht besteht, kann dem Konstruktionsteil nur eine bestimmte Lebenserwartung zuerkannt werden, die um so kleiner ist, je rascher sich die Lastwechsel folgen und je höher die Nennspannung gewählt wird. Ob auch Maschinenteile aus nicht homogenem, mit Flocken oder Einschlüssen durchsetzten oder durch Mikrorisse unterbrochenem Material nur eine beschränkte Lebensdauer und keine Dauerfestigkeit haben, ist nicht ganz sicher. Tatsache ist eher, dass Teile dieser Art eine ausserordentlich flache Schadenlinie aufweisen, so dass sie praktisch nicht überlastbar sind und schon bei kleinen Ueberlastungen rasch brechen, während einwandfreie Maschinenelemente solche ohne Schaden ertragen können. Da gerade im Dieselmotor vorübergehende Ueberbeanspruchungen immer wieder vorkommen, sei es durch Aenderung des Zünddruckes infolge wechselnder Brennstoffeigenschaften oder Veränderungen im Einspritzsystem oder aber beim Durchfahren von Resonanzbereichen, so haben Materialfehler hier praktisch die selben Folgen wie schlechte Formgebung und Korrosion.

Unter Wechselbeanspruchung verhält sich die Rand- oder Grenzschicht von Konstruktionsteilen grundsätzlich anders als das Innere des Materials, so dass sich sehr bald Eigenspannungen ausbilden, die selbst in entlastetem Zustande in Form einer sog. Zug- oder Druckhaut teilweise bestehen bleiben. Liegt aber keine Kaltverfestigung der Oberfläche als Folge der Bearbeitung oder einer besonderen Vorbehandlung vor, so bleiben diese Eigenspannungen auf die äusserste Schicht von wenigen Hundertstelmmillimetern beschränkt. Die Dauerfestigkeit wird vor allem bei hochwertigen Stählen durch eine Druckhaut erhöht, weshalb in vielen Fällen und besonders bei der Fabrikation hochgezüchteter Motoren in Leichtbauweise eine solche nach verschiedenen Verfahren auf einzelne Konstruktionsteile aufgebracht wird. Während das Nitrieren nur eine sehr dünne und harte und darum sehr empfindliche Druckhaut liefert, ergeben andere Oberflächenhärtungsverfahren (Einsatz-, Flamm- oder Induktionshärten) Druckschichten von erheblicher Dicke.

In Passungen und Einspannungen kann durch solche Massnahmen erfahrungsgemäss die Neigung zu Ermüdungsbrüchen vermieden werden. Aber gerade an diesen Stellen ist der Zusammenhang zwischen Oberflächenhärtung und erhöhter Dauerfestigkeit nicht eindeutig bestimmbar, sind doch Dauerbrüche in Einspannungen häufig oberflächenbedingt. Die sehr kleinen Relativbewegungen zwischen den Elementen der Paarverbindungen unter Wechselbeanspruchung ermüden die Oberflächen, lockern also das kristalline Gefüge, so dass Sauerstoff eindringt und Reiboxydation erzeugt. Dabei sich bildende Oxydhäutchen wirken sich als submikroskopische Oberflächenrauigkeiten aus und beeinträchtigen die Dauerfestigkeit, wie alle Oberflächenrauigkeiten überhaupt. So lässt sich die Erhöhung der Dauerfestigkeit in Einspannungen dank der Oberflächenhärtung wenigstens teilweise auf eine Verdichtung der Aussenhaut zurückführen und nicht allein auf die aufgebrachten Eigenspannungen.

Demgegenüber ist es aber eine vielfach erwiesene Tatsache, dass günstige Eigenspannungssysteme nicht nur in Passungen, sondern auch bei freien Oberflächen, wo sie z. B. durch Kugelstrahlen oder Kaltrollen erzeugt werden, die Dauerfestigkeit erhöhen, was kaum mit einer Oberflächenverdichtung im Zusammenhang steht. Die Verfestigungsmöglichkeit durch Druckeigenspannungen ist vor allem Stäh-

len mit hoher Bruchfestigkeit und hoher Fließgrenze eigen und trifft auf kleine Stücke wesentlich stärker zu als auf grössere von gleicher geometrischer Form. Bei weichen Baustählen liegen die Verhältnisse anders, sagt doch der schon zitierte Bericht Nr. 173 der EMPA darüber aus, dass einerseits ungünstig erscheinende Eigenspannungen in Stücken aus fehlerfreiem, weichem Baustahl nicht schaden, andererseits aber auch günstig erscheinende Eigenspannungen im unverfestigten Material nicht nennenswert nützen, so dass mit Hilfe von Eigenspannungen allein in einwandfreien Werkstücken weder eine Hebung noch eine Senkung der Dauerfestigkeit zu erwarten sei. Eine Erklärung hierfür ist wohl im Spannungsabbau bei dauernd wechselnder und schwelender Beanspruchung zu suchen, der durch plastische Verformung zustande kommt.

Alle die vorerwähnten Probleme spielen im Dieselmotorenbau nicht nur wegen der mechanischen Wechselbeanspruchung selbst eine Rolle, sondern auch wegen der gleichzeitig auftretenden hohen Temperaturen, sowie der Anwesenheit korrosiver Gase und Flüssigkeiten; sie sind mit in Berücksichtigung zu ziehen bei der Wahl zwischen langsam- und schnelllaufenden Maschinen. Zwar hat die Frequenz der Wechselbeanspruchung auf die Dauerfestigkeit in weiten Grenzen keinen nennenswerten Einfluss.

Wie aber steht es mit den Teilen, die keine Dauerfestigkeit, sondern nur eine bestimmte, von der Anzahl der Lastwechsel abhängige Lebensdauer haben, weil sie unter dem Einfluss korrosiver Gase und Flüssigkeiten stehen, und dies zum Teil noch bei hohen Temperaturen? Sie werden bei der langsamlaufenden Maschine einfach länger im Gebrauch stehen können, bis sie wegen Verschleiss oder Anrissen ausgedient werden müssen. Abnützungen von Zylinderbüchsen und Kolbenfedern lassen sich als Ermüdungserscheinungen der durch Reibung wechselnd beanspruchten und unter Einwirkung korrosiver Gase stehenden Oberflächenpartien deuten. Zahlreiche Elemente, die vom Kühlwasser, gelegentlich auch von Meerwasser, bestrichen werden, stehen ebenfalls unter Wechselbeanspruchung und haben eine Zeitfestigkeit, d. h. sie ertragen eine von der Spannung abhängige Lastspielzahl. Mineralische Verkrustungen aus dem Kühlwasser entziehen glücklicherweise sehr oft die metallischen Oberflächen der korrosiven Einwirkung, allerdings nicht an Stellen grosser, wechselnder Deformationen. Falls Wasser oder Verbrennungsgase ins Schmieröl gelangen, so sind praktisch alle Lager und Zapfen der Korrosion ausgesetzt und gehen der Dauerfestigkeit verlustig. Bei den grossen, langsamlaufenden Maschinen der Kreuzkopfbauart kann durch eine Stopfbüchse um die Kolbenstange oder eine Abdichtung am Kolbenumfang mit Oelabstreifern und Gasabzug das Eindringen von Verbrennungsgasen und -rückständen ins Kurbelgehäuse verhindert werden, während bei raschlaufenden Motoren mit Rücksicht auf die Herstellungskosten derartige Schutzmassnahmen keine Anwendung finden. Dies alles spricht für die längere Lebensdauer der langsamlaufenden und darum grossen Motoren.

Zugunsten des raschlaufenden, dafür aber kleineren Motors spricht der sog. Grösseneinfluss, d. h. der Umstand, dass bei geometrischer Aehnlichkeit der kleineren Konstruktionsteile eine höhere Dauer- bzw. Zeitfestigkeit aufweist. Bei wechselnder oder schwelender Biegebeanspruchung, oder allgemein in Fällen, wo sich auch in glatten Konstruktionsteilen eine ungleichmässige Beanspruchung über den Querschnitt ergibt, zeigt sich ein erheblicher Grösseneinfluss in angedeutetem Sinne; auch sind grosse Teile immer empfindlicher auf scharfe Kerben als kleine. Neuere Versuche haben aber gezeigt, dass bei Zugerbeanspruchung — und eine solche tritt in vielen Elementen der Dieselmotoren auf — ein Grösseneinfluss nicht oder nicht eindeutig nachgewiesen werden kann, sofern die konstruktive Gestaltung fehlerfrei ist. Der wiederholt zitierte Bericht Nr. 173 der EMPA sagt darüber wörtlich aus: «Merkt man daher einen sog. Grösseneinfluss, dann ist das grosse Stück von geringerer Qualität», und begründet diese These wie folgt: «Da den Ermüdungsschäden plastische Verformung und Zerrüttung des Gefüges vorausgehen, die in Vielkristallen von der Grösse des Maschinenteiles unabhängig sind, ist diese Unabhängigkeit auch für die Ermüdung zu erwarten.»

Das Wegfallen eines Grösseneinflusses setzt allerdings voraus, dass die grossen Stücke in der Werkstätte ebenso ein-

wandfrei hergestellt, thermisch behandelt und bearbeitet werden wie die kleinen, und dass das Material auch bei den grossen Stücken durchgehend einwandfrei sei. Die reiche Erfahrung, die zahlreichen technischen Hilfsmittel und Bearbeitungsmöglichkeiten, wie sie den altbewährten Grossunternehmen der Motorenbranche zur Verfügung stehen, sowie die modernen Methoden für zerstörungsfreie Materialprüfung bieten die Gewähr dafür, dass auch grosse und grösste Stücke die Qualität der kleinen aufweisen. Der Grösseneinfluss kann sich sogar zugunsten der grossen Maschinen auswirken, und zwar bei regellos verteilten Materialfehlern in Form von Lockerstellen, die sich auf einen kleinen Querschnitt viel ungünstiger auswirken als auf einen grossen.

Bevor sich aber an raschlaufenden Maschinen Ermüdungserscheinungen in Form von Rissen oder Brüchen zeigen, tritt eher eine Lockerung aller Verbindungen ein, d. h. die Vorspannungen und genauen Passungen gehen verloren, und dies erhöht dann die Bruchgefahr erheblich. Die Lockerung der Schraubenverbindungen und der Verlust der Vorspannungen sind eine Folge von Verschleissvorgängen an den Kontaktflächen, die unter Einwirkung schwellender Kräfte kleinste Verschiebungen gegeneinander ausführen. Von der Bearbeitung herrührende Oberflächenrauigkeiten werden dadurch abgetragen, und die sich daraus ergebenden Längenänderungen fallen natürlich bei den kleinen Motoren stärker ins Gewicht als bei den grossen. Darum bedürfen die kleineren, raschlaufenden Maschinen häufigerer Ueberholungen als die grossen, d. h. ihr Unterhalt wird kostspieliger.

Erfahrungsgemäss wird bei den grossen und kleinen Maschinen, Langsam- und Schnellläufern an den Reibflächen pro Zeiteinheit ungefähr gleichviel Material abgetragen. Die prozentualen Lager-, Wellen- und Zylinderabnützungen sind darum in der gleichen Zeit beim kleinen Schnellläufer viel

stärker als beim grossen Langsamläufer. Zylindereinsätze, Kolbenfedern und Lager müssen viel häufiger ausgewechselt werden, was die Unterhaltskosten abermals ungünstig beeinflusst.

Mit feinsten Bearbeitung aller Kontaktflächen, also Schleifen, Schaben und Auftouchieren, besonderer Oberflächenbehandlung wechselnd beanspruchter Teile, die der Korrosion oder Reiboxydation ausgesetzt sind, Ausschaltung der Korrosionsursachen durch Auswahl der Brennstoffe und Schutzmassnahmen gegen Korrosion an gekühlten Oberflächen, wie Zinkschutz, Süsswasserkühlung und Entlüftung des Kühlwassers, kann man vielen Nachteilen des Schnellläufers begegnen, doch geht dadurch der preisliche Vorteil verloren. Wo also der Verwendungszweck nicht ein kleines Motorengewicht pro Leistungseinheit vorschreibt, oder der Platzbedarf entscheidend mitspielt, ist der grossen, langsamlaufenden Maschine unbedingt den Vorzug zu geben; denn sie hat die grössere Lebensdauer, die geringeren Unterhaltskosten, verlangt weniger häufige Revisionen und ist für den Betrieb mit billigeren Brennstoffen besonders gebaut. Bei Zweitaktmotoren mit Schlitzspülung kommt zu den aufgezählten Gesichtspunkten noch der Umstand hinzu, dass die Schlitzverschmutzung in gleicher Zeit am grossen Motor prozentual weniger Querschnitt ausfüllt als am kleinen.

Die Wahl zwischen einer grossen, langsamlaufenden und langlebigen, aber teureren Maschine einerseits und einem bis mehreren kleineren, raschlaufenden und billigeren Motoren mit den erwähnten Nachteilen hinsichtlich Ermüdung und Verschleiss hängt natürlich vom Betriebs- und Belastungsprogramm, vom Verhältnis zwischen Betriebs- und Anlagekosten und in besonderem Fällen vom Gewicht und Raumbedarf der Maschinen ab.

Adresse des Verfassers: Prof. E. Hablützel, Oststr. 25, Winterthur

Büchi-Duplex-Turboaufladung eines schnellaufenden Zweitakt-Dieselmotors mit Längsspülung

Von Dr. sc. techn. h. c. Alfred J. Büchi, Winterthur/Hurden

DK 621.436.13.052

1. Allgemeines

Die Büchi-Duplex-Turboaufladung für Brennkraftmaschinen aller Prozessarten besteht darin, dass der Brennkraftmaschine ausser durch einen Turbolader noch durch ein von dieser oder anderweitig angetriebenes Gebläse (vorzugsweise Zentrifugalgebläse) entweder direkt oder über den Turbolader vorverdichtete Ladeluft zugeführt wird. Dabei erfolgt die Umschaltung der Förderung der vorverdichteten Ladeluft des mechanisch oder sonstwie angetriebenen Gebläses direkt zur Brennkraftmaschine oder in Serie über den Turbolader vorzugsweise mittels Organen, die durch die verschiedenen hoch erzeugten Drücke der Ladeluft in den zwei Ladern selbsttätig eingestellt werden. Die vorverdichtete Ladung des Vorgebläses gelangt dadurch beim Start, bei kleiner Belastung oder kleiner Drehzahl des Motors, wenn der Turbolader langsam läuft, direkt zu dessen Zylindern, so dass deren Spülung auch dann voll sichergestellt ist. Damit strömt auch beim Start sofort viel angewärmte Luft in die Zylinder, was die Zündfreudigkeit der Maschine verbessert. Nimmt die Belastung bzw. die Drehzahl der Brennkraftmaschine zu, so steigt auch die Drehzahl des Turboladers; seine Fördermenge und sein Förderdruck wachsen, und wenn dieser über den Druck des Vorgebläses angestiegen ist, schliesst das Abschlussorgan gegen das Vorgebläse selbsttätig, während sich zugleich das Abschlussorgan hinter dem Turbogebläse öffnet, und das Vorgebläse beginnt als Vorstufe zum Turbolader seine Fördermenge bei seinem Förderdruck an den Turbolader abzugeben. Dadurch werden der Förderdruck und die Fördermenge des Turboladers zusätzlich erhöht, so dass auch eine entsprechend verbesserte Spülung und Ladung erfolgt sowie eine entsprechend vergrösserte höchste Leistung von der Brennkraftmaschine entwickelt werden kann.

Bild 1 zeigt an einem Beispiel die Anordnung und den Anbau sowie die selbsttätige Schaltung der für die Duplex-Turboaufladung benötigten Gebläse und Leitungen an einer Sechszylinder-Zweitakt-Brennkraftmaschine. *a* ist ein vom Motor *M* mittels eines Getriebes *G* irgendwelcher Art selbst

angetriebenes Zentrifugalgebläse, das beim Start der Maschine oder bei kleiner Belastung sofort und direkt Spül- und Ladeluft liefert. Solange sein Förderdruck höher ist als derjenige des Abgasturboladers *b*, bleiben die Klappen *c* geöffnet und die Klappen *d*, welche Ladeluft vom Turbolader her zum Spülreceiver *e* führen, geschlossen. Hat hingegen der infolge höherer Leistung vom Turbolader erzeugte Druck den Druck des Laders *a* überschritten, so schliessen sich die Klappen *c*, und es öffnen sich die Klappen *d*, so dass nun die gesamte Förderung des Gebläses *a* durch den Förderstutzen *f* zum Turbolader *b* gelangt, d. h. die beiden Gebläse *a* und *b* selbsttätig in Serie geschaltet sind. Dabei ist es gleichgültig, ob die Abgasturbine *g* mit pulsierendem oder mit konstantem Druck arbeitet.

Die in Bild 1 gezeigte Anordnung gilt für die Durchführung der erstgenannten Arbeitsweise, d. h. des Impulsverfahrens (auch Stossverfahren genannt). Dies ist aus der Anordnung von zwei getrennten Abgasleitungen *h* und *i* ersichtlich, die zu ebenfalls getrennten Düsenräumen *k* der Turbine führen. Selbstverständlich müssen dabei auch die Abgasleitungen und die Eintrittsquerschnitte in die Turbine richtig bemessen und die Steuerung entsprechend ausgebildet sein, was in Bild 1 der Einfachheit halber nicht zur Darstellung gebracht wurde.

2. Die untersuchte Maschine

Die Auflade-Untersuchungen, über welche hier berichtet werden soll, wurden an einer schnellaufenden Zweitakt-Dieselmotormaschine mit Längsspülung im Brennkraftzylinder und von für solche Maschinen eher kleinerer Leistungsgrösse durchgeführt. Der Einlass der Spül- und Ladeluft geschieht durch tangential zum Zylinderumfang gerichtete Schlitze in der Nähe der unteren Totpunktlage und der Auslass durch je drei Auspuffventile pro Zylinderabschluss. Diese Maschine war ursprünglich mit einem selbst angetriebenen Roots-Gebläse als Spül- und Ladeluftgebläse ausgerüstet. Sie hat offene Brennräume. Die Einspritzung des Brennstoffes erfolgt in diese je