VORWORT

Gegenkolbenmotoren (GKMs) blicken zurück auf eine über 120-jährige Entwicklungsgeschichte und sind sowohl als Otto- wie auch als Dieselmotoren gebaut worden. Die Möglichkeiten für eine Verbesserung des Wirkungsgrades und der spezifischen Leistung waren für die Ingenieure schon immer sehr attraktiv. Diesel-GKM sind schon vor Jahrzehnten regulär in Flugzeugen eingesetzt worden wegen ihres hervorragenden Leistungsgewichtes, aber sie haben auch große Handelsschiffe angetrieben mit einigen 1000kW.

Bereits 1935 konnte ein Wirkungsgrad von über 40% erzielt werden. In den letzten Jahrzehnten schien diese Technik jedoch vergessen und die Motorenentwicklung richtete ihr Hauptaugenmerk auf die Verbesserung der Emissionen.

Die konventionelle GKM-Technologie ist bekannt für Emissionsprobleme, die hauptsächlich durch das in die Ein- und Auslasskanäle gestreifte Schmieröl verursacht werden. In der Regel werden GKM im Zweitakt-Verfahren betrieben und die Kolben steuern selbst den Gaswechsel, indem sie Ein- und Auslassöffnungen im Zylinder überlaufen.

In letzter Zeit gibt es jedoch wieder einige neue Entwicklungen, die zeigen, dass das Potenzial dieser Technik noch nicht ausgeschöpft ist. In thermodynamischer Hinsicht ist es vorteilhaft, dass zwei Kolben einen gemeinsamen Brennraum teilen, was zu einem günstigeren Volumen/Oberfläche-Verhältnis führt. Dennoch wird auch bei diesen Motoren der Gaswechsel noch mittels der Kolben vorgenommen.

DER NEUE ELSBETT-4-TAKT-GKM

Der hier vorgestellte GKM läuft im 4-Takt-Verfahren. Hydraulisch bewegte Zylinderbüchsen steuern den Gaswechsel. In ihnen laufen die Kolben - wie bei anderen Viertaktmotoren auch - stets in Laufbüchsen ohne Öffnungen oder Durchbrüchen.

Einige Prototypen wurden bereits getestet, und demonstrierten erfolgreich, dass die Schiebebüchsen einwandfrei funktionieren und sehr geringe Reibung haben. Zur Reduzierung der bewegten Massen kann die Wandstärke dieser Schiebebüchsen gering gehalten werden, da sie in der Zylinderbohrung praktisch in voller Länge geführt sind.

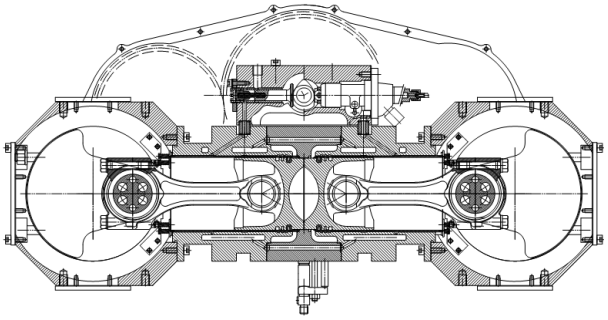

Fig.1 Querschnitt 4-Takt GKM

Obwohl der Experimentier-GKM als Einzylinder aus dem Vollen gefertigt und für die Demozwecke nur mit einer simplen Einspritzung ausgerüstet war, wurde auf dem Prüfstand auf Anhieb ein Verbrauch von 262g/kWh erzielt.

Die Daten: Einzylinder-Viertakt-Saugmotor, Bohrung 108mm, Hub 2x118mm, Leistung 35 kW bei 1500 U/min.

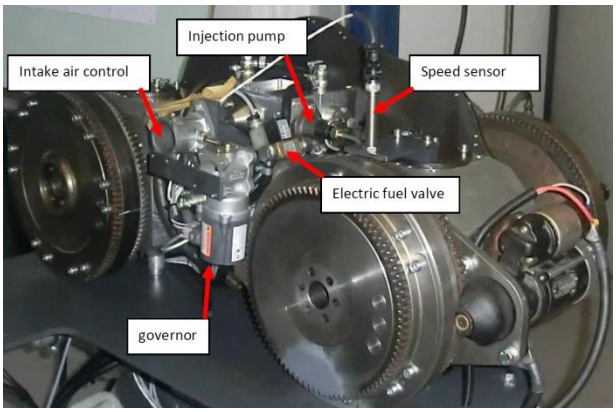

Fig.2 Motor auf dem Prüfstand

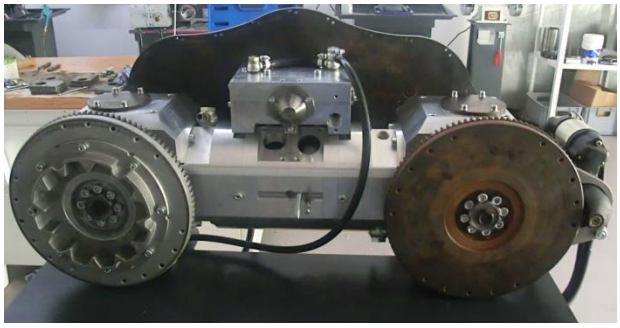

Fig.3 Motor ohne angebaute Teile

Die Ein- und Auslasskanäle sind nahe des inneren Kolben-Totpunktes angebracht (beim herkömmlichen GKM am Ende des Hubes) und werden durch das darüber geschobene innere Ende der Schiebebüchsen mittels Federkraft geschlossen gehalten. Die Öffnung erfolgt hydraulisch.

Im Gegensatz zu konventionellen GKM gibt es keinen ausgesprochenen Auslass- und Einlasskolben, so dass beide Kolben nahezu gleiche Temperatur aufweisen. Als Hydraulikmedium dient das Schmieröl, daher sind innere Leckagen unkritisch und der Ölkreislauf ist einfach.

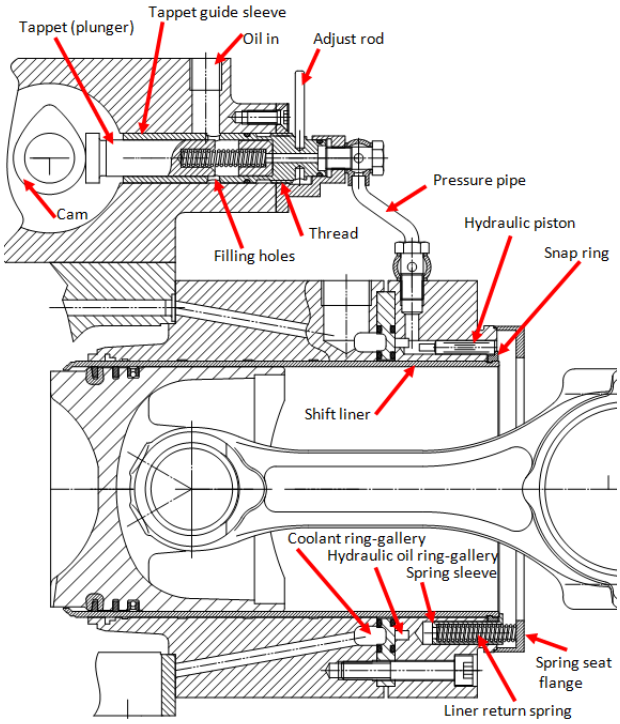

Fig.4 Funktion der variablen Steuerzeiten

Das Volumen zwischen Tappet (Stößel) und Hydraulikkolben wird mit Öl gefüllt. Der rotierende Nocken hebt den Stößel an bis die Ölzufuhr verschlossen ist und das eingeschlossene Öl nun auf die Hydraulikkolben einwirkt, wodurch die Schiebebüchse nun gegen die Federkraft geöffnet wird. Eine Verdrehung des Gewindes der Stößelführung verändert den Vorhub und erlaubt damit eine Beeinflussung der Steuerzeit.

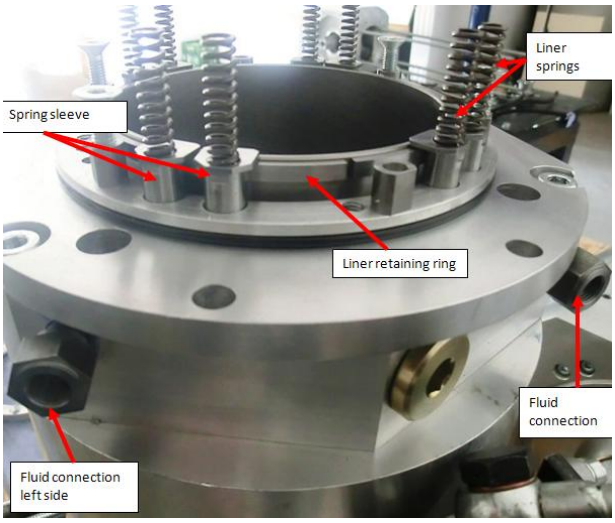

Fig.5 Schließfedern am Büchsenende

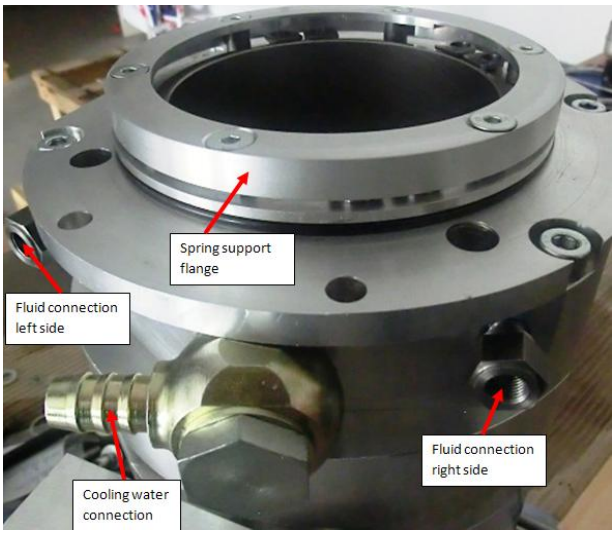

Fig.6 Schließfedern vorgespannt

Die hier gezeigte Konstruktion erlaubt 2 Optionen für das Einspritzsystem: Einspritzung von außen nach innen (von kalt nach heiß) oder – wie bei konventionellen Systemen gut erprobt – Einspritzung über Brennkammermitte in Richtung Brennkammerwand (von heiß nach kalt). Für die erste Option können mehrere Düsen um

den Zylinder herum angebracht sein, was eine sequentielle Einspritzung erlaubt (d.h. die Düsen spritzen nacheinander ein, so dass sich ggf. ein Drall erübrigt).

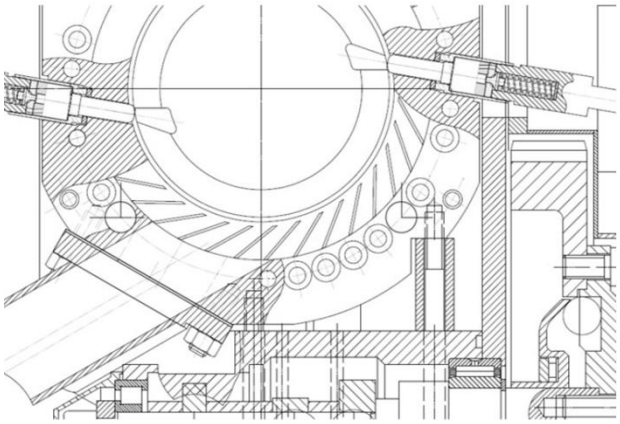

Fig.7 Einspritzung mit 2 Düsen (Prototyp)

Fig.8 Drallring im Einlasskanal

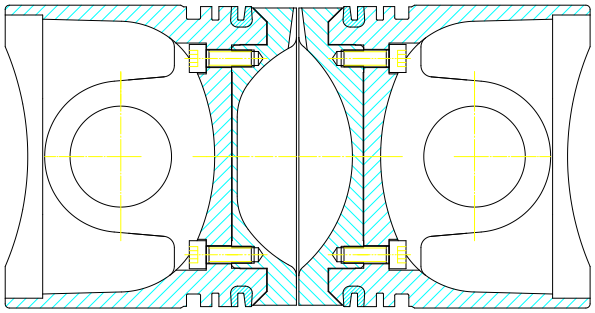

Fig.9 Hitzeschild-Isolierung, größeres Volumen im (etwas kälteren) Einlass-Kolben

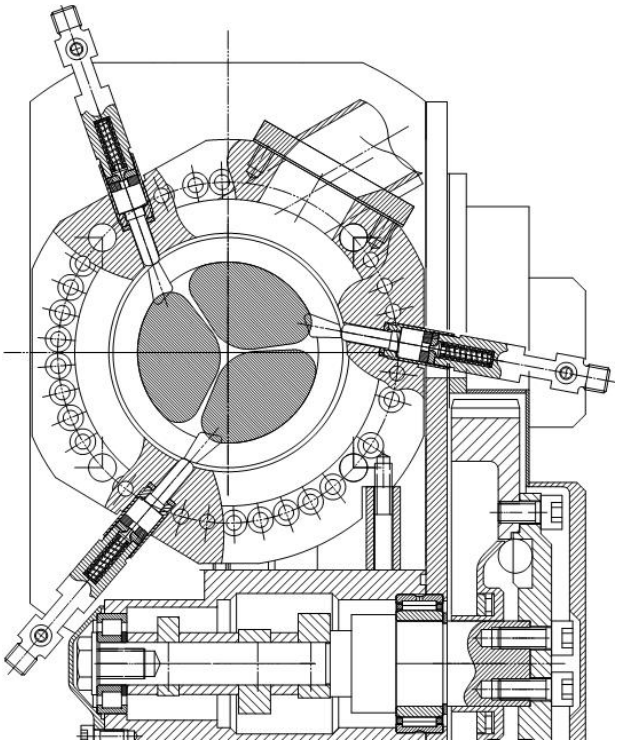

Fig.10 Sequentielle Einspritzung in einzelne Brennraumsegmente

Für die zweite Option muss man sich die Zylinderwand als virtuellen Zylinderkopf vorstellen, inklusive des um 90° gedrehten Brennraums. Damit werden die konventionellen Verhältnisse nachempfunden.

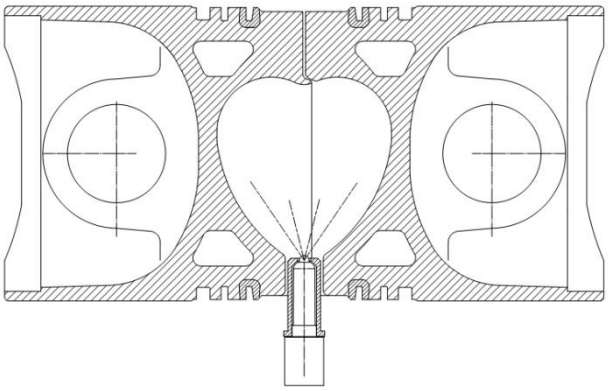

Fig.11 Einspritzung in Anlehnung an konventionelle Brennraumverhältnisse

Mit der zentralen Einspritzung über der Brennraummitte kann man auf die Erfahrungen mit herkömmlichen Brennverfahren

zurückgreifen, benötigt hier jedoch nur eine Düse für 2 Kolben.

Da die Kolbenringe keine Schlitze oder Stege überfahren müssen, hat der gezeigte Motor sehr große Ein- und Auslassquerschnitte. Das resultiert in geringeren Strömungswiderständen und besserer Zylinderfüllung, wie auch schon Tests in der Vergangenheit gezeigt hatten.

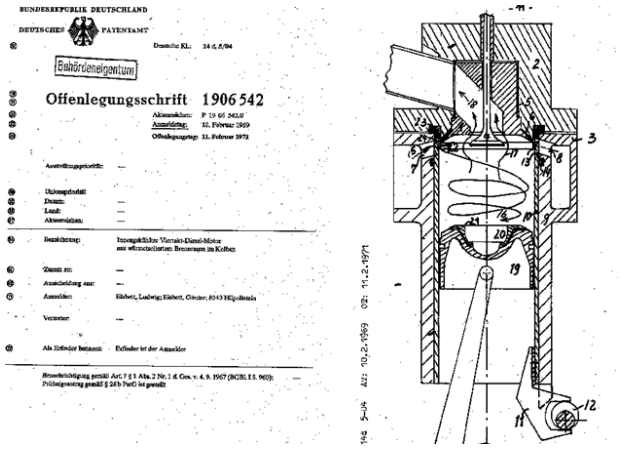

Fig.12 Vorausgegangene Versuche mit Schiebebüchsen (Elsbett 1969): Nockengetriebene Büchse am MAN 0836

Die kritische Zone dieser Konstruktion ist die Abdichtung zwischen Büchse und Ein- und Auslasskanal. Übliche Ventile werden durch den Zylinderdruck geschlossen gehalten, auch wenn sie nicht 100% dicht sind, während die kleinste Undichtheit der Büchsendichtung dazu führen würde, dass der Gasdruck auf die Dichtfläche der Büchse drückt und diese – auch gegen die schließende Federkraft – öffnen könnte.

Unter den zahlreich erprobten Gegenmaßnahmen hat sich am besten bewährt, den äußeren Durchmesser der dichtenden Ringfläche kleiner als den inneren Büchsendurchmesser auszuführen, so dass auch hier der Gasdruck die Büchse auf ihren Dichtsitz drückt. Während die Schiebebüchse aus Grauguss besteht, ist die Dichtfläche separat aus Ventilstahl hergestellt und z.B. mittels Elektronenstrahl-Schweißen fest mit der Büchse verbunden.

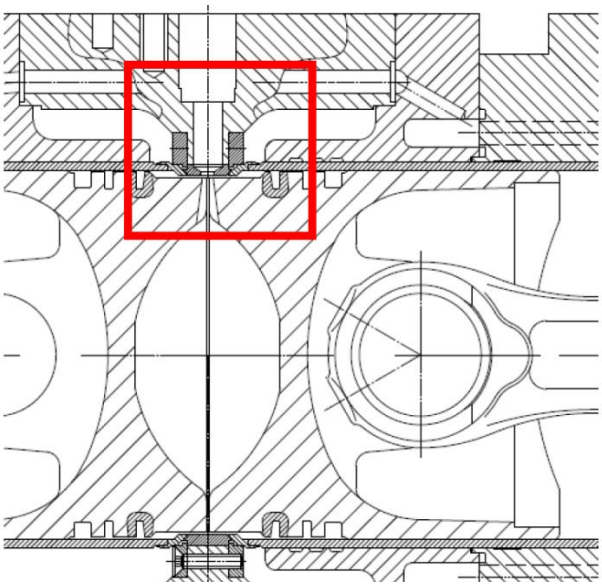

Fig.13 Bereich der Büchsendichtung

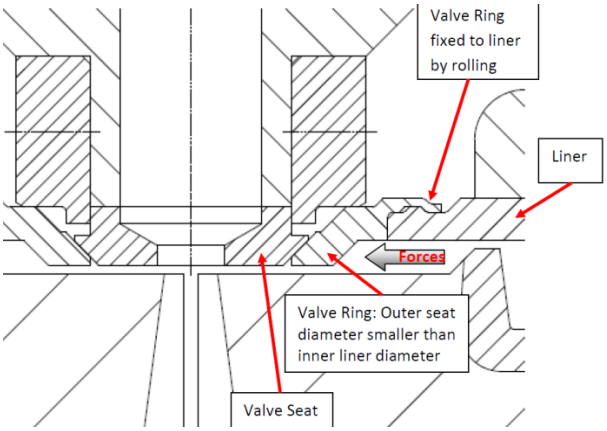

Fig.14 Detail-Ausschnitt der Büchsendichtung

Fig.15 Büchse mit aufgerolltem Dichtring

Die hier gezeigte konische Dichtfläche in Anlehnung an herkömmliche Dichtkegel ist keineswegs ein Muss. Ein flacher Ventilsitz ist einfacher herzustellen und das Gas strömt sowieso lieber auf geradem Wege in den Zylinder hinein und wieder heraus. Ohne Strömungsumlenkung geht auch weniger Wärme an das Material verloren.

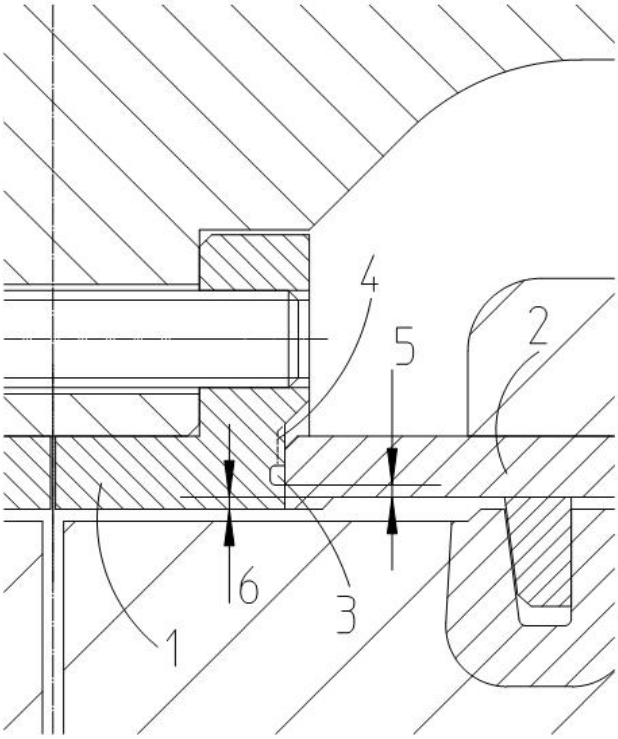

Fig.16 Details einer flachen Büchsendichtung: 1)Ventilsitz, 2) Schiebebüchse, 3) Druck-Entlastungsnut, 4) nach außen führender Entlastungsschlitz, 5) Dichtungsfläche größer als innerer Büchsendurchmesser, 6) Dichtungsfläche kleiner als Büchsendurchmesser

Die Struktur der Konstruktion ist auf leichtes Gewicht ausgelegt. Deshalb werden sämtliche Gaskräfte von durchgehenden Zugankern aufgenommen und alle dazwischen liegenden Teile von Zug- und Biegespannung entlastet.

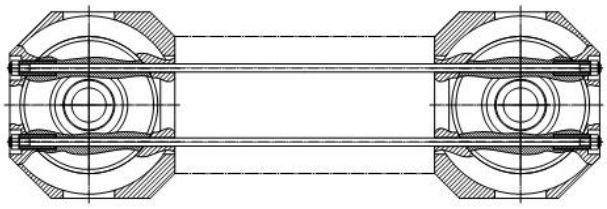

Fig.17 Konstruktion mit langen Ankern

Diese Anker halten auch die beiden Kurbelgehäuse und Zylinder zusammen. Beide Kurbelwellen sind über Zahnräder synchronisiert, wobei das Mittelrad 1:2 übersetzt ist und die Nockenwelle antreibt.

Fig.18 Basis Motor

Fig.19 Zahnradtrieb

Im Vergleich zu herkömmlichen Motoren ist der größte Vorteil von GKMs die geringere wärmeabsorbierende Oberfläche des Brennraums.

Fig.20 Kolben mit Brennraum und Schnaupen für Einspritzung

Von Anfang an diente die Theorie der Wärmelehre als Basis von Forschung und Entwicklung an Verbrennungsmotoren. Entsprechend dieser Theorien hat Rudolf Diesel seinen ersten Motor konstruiert mit einem Verdichtungsverhältnis von 1:100 - für ein Maximum an Expansion, ist aber an den extremen Wärmeverlusten gescheitert. Es dauerte noch Jahre, ehe er mit dem Diesel-Zyklus eine bessere Effizienz gegenüber dem Otto-Zyklus nachweisen konnte (Biographie Rudolf Diesel).

In thermodynamischer Hinsicht kann ein GKM-Trieb auch mit einem herkömmlichen Motor verglichen werden, dessen Hub verdoppelt wurde. Die Einschränkungen durch die verdoppelte Kolbengeschwindigkeit müssen hierbei natürlich außer Betracht bleiben. Immer wird das Gas komprimiert und expandiert in einem Zylinder, dessen Enden mit einer Deckplatte oder Kolben verschlossen werden. Dem eingeschlossenen Gas ist es egal, welches der beiden Enden bewegt werden muss um das Volumen zu verändern. Nur der absolute Hub zwischen beiden Zylinder-Enden ist relevant für die dynamische Volumenänderung des Arbeitsgases.

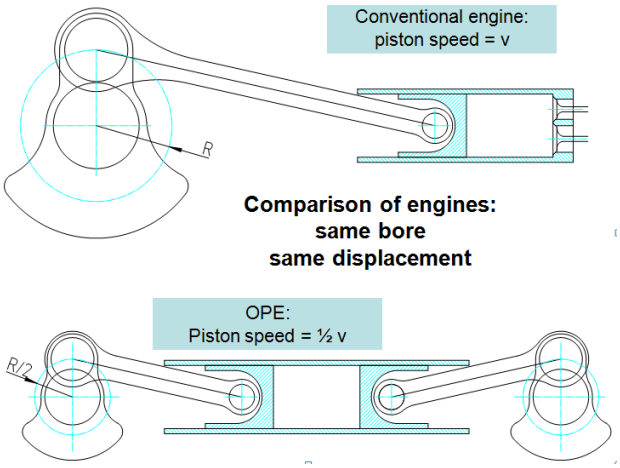

Fig.21 Verschiedene Langhub-Systeme

Ein GKM kann jedoch doppelt so schnell drehen und damit theoretisch die doppelte Leistung erreichen. Das Hubvolumen ist aufgeteilt in 2 Zylinder ohne Zylinderkopf. Woschni (et al.) definiert verminderte Wärmeverluste durch Erhöhung der Wandtemperatur und setzt im Idealfall den Wärmedurchgang auf null. Da jedoch keine Anpassung an die laufend veränderten thermodynamischen Bedingungen stattfindet (beispielsweise durch modifizierte Steuerzeiten, oder Atkinson- oder Miller-Zyklus, verschwindet ein Großteil der Enthalpie im Abgas.

Unsere Versuche an einem vollkeramischen Motor (Ende der 80-er in Japan) zeigten zudem, dass in gut isolierten Brennräumen eine Verzögerung der Flammenausbreitung auftrat. Diese Erkenntnisse lassen sich jedoch nicht auf den hier vorgestellten GKM anwenden, denn anstelle erhöhter Temperatur der Brennraumwände wird eine verminderte Oberfläche der Brennraumwände angestrebt. Auf diese Weise nutzt der GKM viele Vorteile von Motoren mit größerem Zylindervolumen, bzw. von Langhubern, wobei die Gasexpansionsgeschwindigkeit sich nun nicht mehr auf die einfache Kolbengeschwindigkeit bezieht, sondern auf deren doppelten Wert.

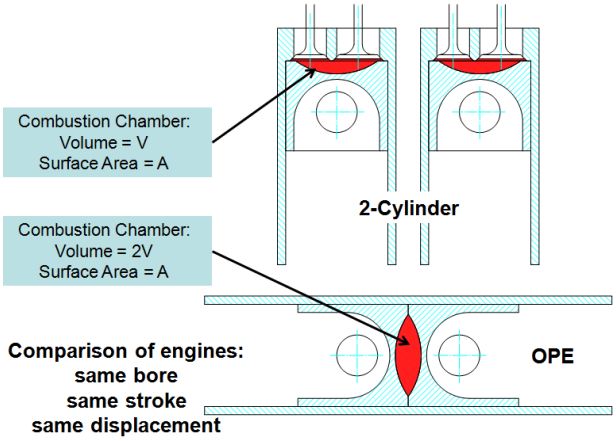

Fig.22 Verhältnis von Brennkammervolumen zu Brennkammeroberfläche GKM/conventional = 2:1

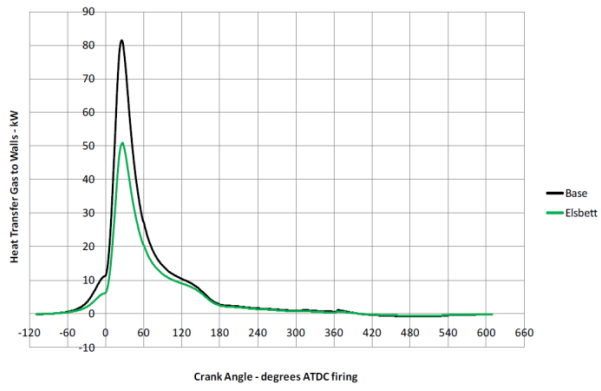

Fig.23 Simulierter Vergleich: Wärme-transfer eines konventionellen Viertakt-Motors und Viertakt-GKM

Die folgende Tabelle vergleicht einen traditionellen Zweitakt-GKM mit dem neuen Viertakt-GKM mit Schiebebüchsen.

	Conventional 2SOPE	New 4SOPE
Engine Layout	2 pistons working opposite in 1 cylinder	2 pistons working opposite in 1 cylinder
Cycle	One complete cycle during one crankshaft rotation	One complete cycle during two crankshaft rotations
Scavenging	Done by pistons, opening an exhaust gap in the cylinder wall near exhaust-piston-BDC, opening an intake gap near intake-Piston BDC	By shifted liners, opening exhaust and intake near TDC, independent of piston position
Injection	Lateral, from cylinder wall to combustion chamber center	Lateral, from cylinder wall to combustion chamber center Alternative: Conventional injection with virtual cylinder-head (cylinder wall)
Intake/Exhaust-Timing	Depending on gap position in cylinder wall and phase shifting of pistons	Free programmable without phase shifting
Balancing	Due to phase shifting not 100% balanced	100% balanced

Fig.24 Vergleich Zwei- und Viertakt-GKM

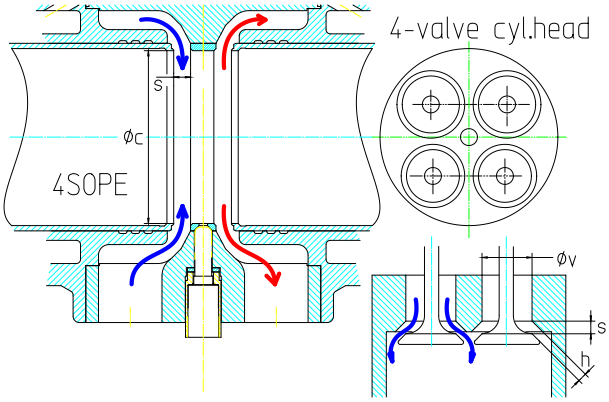

Fig.25 Vergleich der Gaswechselquer-schnitte

Die Strömungsquerschnitte welche durch Schiebebüchsen ermöglicht werden sind größer als die in konventionellen 4-Ventil-Zylinderköpfen. Um eine möglichst gute Zylinderfüllung sicher zu stellen, sollen in der Regel die Einlassorgane im Zylinder-kopf größer sein, als die Auslassorgane. Mit Schiebebüchsen muss darauf keine Rücksicht genommen werden, so dass auch der Austritt der Abgase aus dem Zylinder effizienter erfolgen kann.

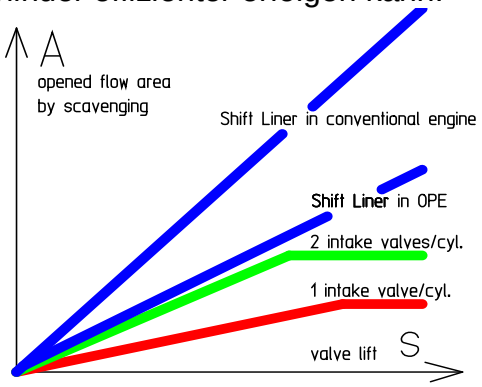

Fig.26 Vergleich verschiedener Gas-wechselsysteme

Ein interessanter Aspekt dieser Technologie ist, dass das beschriebene Gaswechselsystem auch bei herkömm-lichen Motoren zur Anwendung gelangen kann. Der Vorteil dieser Technik zeigt sich hier verstärkt, da im Vergleich zum GKM nur noch die Hälfte der Gasmenge durch die ansonsten gleichen Querschnitte der Gaswechselorgane strömen muss.

Die Öffnungsquerschnitte (Fig. 25) der gesteuerten Schiebebüchsen lassen sich leicht berechnen: $A = \Phi_{cyl.} \cdot \pi \cdot s$, d.h. sie hängen ab vom Durchmesser und vom Hub.

Die Öffnungsquerschnitte konventioneller Ventile werden berechnet mit: $A_{valve} = \Phi_{valve} \cdot \pi \cdot h$, sie können aber durch Hub-verlängerung nur maximal bis $A_{valve} = \Phi_{valve} \cdot \pi/4$ vergrößert werden.

Einen Vergleich von GKM und herkömmlichen Motoren, sowohl mit Schiebebüchsen als auch mit Mehrventil-Technik zeigt Fig. 26.

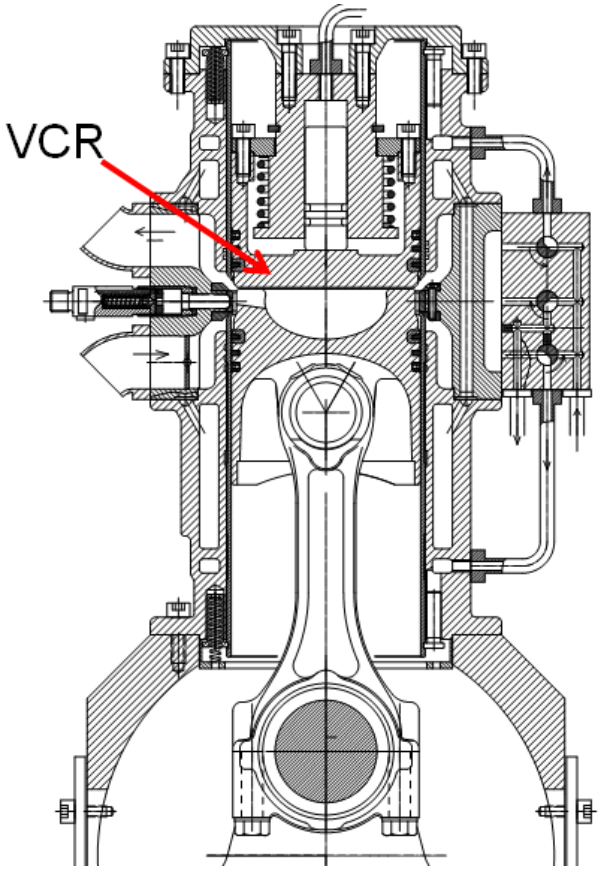

Fig.27 Konventioneller Motor mit Schiebebüchsen-Gaswechsel-System

Struktur und Funktion eines mit dem neuen Gaswechselsystem ausgerüsteten konventionellen Motors ist prinzipiell die Gleiche wie die des 4-Takt-GKM, jedoch ist nur noch einer beiden Kolben an der Kraftübertragung beteiligt, während der zweite den Zylinder anstelle eines Zylinderkopfes abdichtet. So werden getrennte Gaswechselkanäle für Ein- und Auslass beibehalten, aber es entfällt die zweite Kurbelwelle mit entsprechendem Rädertrieb. Gleichzeitig eröffnet sich damit eine elegante Methode für ein variables Kompressionsverhältnis (VCR), welches durch Verschiebung des nicht aktiven Kolbens innerhalb der Schiebebüchse sehr einfach möglich wird.

Da durch die unterbrechungsfreie Schiebebüchse gleiche Verhältnisse für die Kolben wie bei anderen Motoren herrschen, wird auch kein Schmieröl durch die Kolbenringe in die Gaskanäle gefördert. Sämtliche bekannten Methoden zur Verbesserung von Leistung, Verbrauch und Emissionen können auch hier angewandt werden und zu den Vorteilen der hier gezeigten Technologie hinzugefügt werden. Natürlich ist mit diesem System auch ein Zweitaktmotor ohne die Handicaps anderer Zweitakter möglich und auch hier sind flexible Steuerzeiten möglich. Da zwischen Ein- und Auslasskolben keine Phasenverschiebung erforderlich ist, ist ein 100%-iger Massenausgleich gegeben.

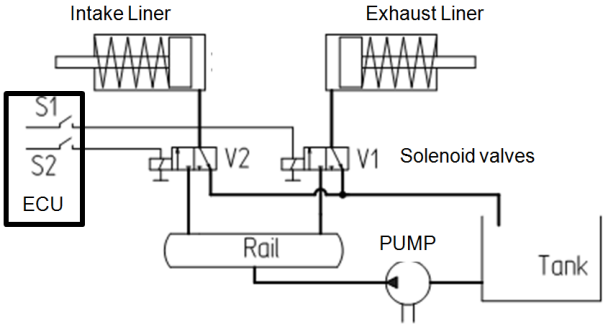

Fig.28 Hydraulische Steuerung mittels Magnetventilen wie bei Common Rail

ECU-gesteuerte Magnetventile für das Timing der hydraulisch bewegten Schiebebüchsen eröffnen eine große Zahl weiterer Vorteile, z.B. die Zu- und Abschaltung von Zylindern im Lauf, ebenso wie das Umschalten in den Atkinson- oder Miller-Zyklus oder eine innere Abgas-Rückführung. Das Umschalten von Vier- auf Zweitakt von einem oder mehreren Zylindern – auch gemischt und während des Betriebes – ist möglich, wie auch das Einfügen von zusätzlichen Leerhüben nach einem abgelaufenen Arbeitszyklus. Solche Zusatzhübe können auch einer Nachexpansion dienen, oder können Gas in einen Druckspeicher pumpen zum Zwecke einer teilweisen Energierückgewinnung, oder auch zur Beschleunigung des Turboladers.

Der Betrieb mit allen bisher verwendeten Kraftstoffen ist möglich: Diesel, Benzin, Methanol, Ethanol, H2, LPG, CNG, Biogas, oder Pflanzenöl.

Mit diesen Vorteilen erschließt sich für das neue Gaswechselsystem der volle Anwendungsbereich von Gegenkolben- und traditionellen Verbrennungsmotoren:

- Stationär: Kraftwerke, Elektro-Aggregate, BHKW, Wasserpumpen (Bewässerungsanlagen), Bergbau

- Marine: Hochsee- und Binnengewässer-Schifffahrt, Sportboote

- Bahnverkehr: Straßenbahn, Lokomotiven und andere Schienenfahrzeuge

- Off-Road: Gabelstapler, Traktoren, Land- und Forstwirtschafts-Maschinen, Hoch- und Tiefbau

- On-Road: Fahrzeuge aller Art, PKW, SUV, Pickup, LKW, Bus, Motorrad, Range Extender

- Militär: Panzer, Jeeps und anderes Miltärgerät (on-road und off-road)

- Luftfahrt: Propeller-Flugzeuge, Helikopter

ZUSAMMENFASSUNG

Herausragende Vorzüge der hier präsentierten Technologie:

- Bei GKM's (2- und 4-Takt): Geringere Wärmeverluste durch optimiertes Volumen-zu-Oberfläche Verhältnis (zwei Kolben teilen sich eine Brennkammer)

- Freiheit bei der Wahl des Mischvorgangs "heiß-nach-kalt" (Einspritzung in Richtung Brennraumwand) oder "kalt-nach-heiß" (Einspritzung in Richtung Brennraummitte)

- Große Gaswechsel-Querschnitte und unbeschränkt variable Steuerzeiten mittels ECU-Steuerung der hydraulischen Schiebebüchsen

- Multi-Takt Zyklen sind möglich (2- und 4-Takt und zusätzliche Hübe, z.B. für Nachexpansion) mit beliebiger Umschaltung während des Betriebes

- Ein- und Auslass kann ggf. in OT voll offen bleiben, ohne Kollisionsgefahr mit dem Kolben oder Erhöhung des schädlichen Raumes

- Einfache Drallerzeugung, ggf. auch variabel

- Ein- und Auslass im Bereich des OT (wie bei herkömmlichen Motoren), daher gibt es beim GKM keine ausgesprochen heiße oder kalte Kolben

- Idealer Massenausgleich, da keine Phasenverschiebung der Kolben zur Erzielung der Steuerzeiten erforderlich

- Einfaches VCR-System (variable Kompression) bei traditionellen Motoren bei Anwendung des Gaswechsels mittels Schiebebüchsen

Die angeführte Technologie präsentiert wohlbekannte Motorentechnologie in Kombination mit den Vorteilen eines kontrollierten Gaswechsels mittels Schiebebüchsen und den Prinzipien der Gegenkolben-Technologie und kann die Basis bilden für zukünftige Forschung und Entwicklung, um die Effizienz des Verbrennungsmotor zu verbessern.