

Die Kreiskolbenmotoren

Entwicklung und Forschung bei der Firma Toyo Kogyo K.K.  
Hiroshima.

Von Kenichi Yamamoto.

1. Der bisherige Ablauf der Entwicklung

5 Jahre sind vergangen, seit die Firma Toyo Kogyo K.K. aufgrund der von der Patentinhaberin, der Firma NSU-Wanke erhaltenen Zeichnungen ihren ersten Versuchsmotor gebaut und in Betrieb genommen hat.

Inzwischen hat man bei der Firma Toyo Kogyo auf allen Gebieten in der Konstruktion des Motors, in der Wahl des Materiales, in den Verfahren zur Messung und in den Herstellungsverfahren intensive Forschung und Entwicklung betrieben.

Im Laufe des ersten Jahres haben wir vorallem die prinzipiellen Erscheinungen des Wankel-Motors und seine problematischen Punkte zu erfassen versucht, und in dem darauffolgenden zweiten Jahr haben wir den Schwerpunkt unserer Forschung auf die Ursachen der grundsätzlichen problematischen Punkte und auf ihre Lösung durch konstruktive Maßnahmen gerichtet.

Im Laufe der letzten 2 Jahren ging unsere Forschung in erster Linie auf eine Verbesserung der ausschlaggebenden Punkte bei der Verwendung des Wankel-Motors im Kraftfahrzeug und auf eine Änderung der verschiedenen, hier hereinspielenden Faktoren. Diese Forschung hat nun den breite-

sten Raum in der ganzen Kreiskolbenmotorentwicklung eingenommen.

Offen gestanden, der Betriebszustand des ersten von uns versuchsweise hergestellten Kreiskolbenmotors und die damit erzielten Ergebnisse haben uns viele, viele sehr schwere Probleme aufgegeben.

Bei der Erforschung der Grundlagen all der vielseitigen Erscheinungen beim Betrieb des neuen Motors haben wir uns keine Illusionen gemacht, einerseits über die unbedingte Notwendigkeit des Sammelns vieler neuer Daten und andererseits über die vielen Schwierigkeiten, die es hierbei zu überwinden galt.

Die Arbeitsweise eines Wankel-Motors ist ja ganz und gar verschieden von der eines Motors mit hin- und hergehendem Kolben und da es auf diesem Gebiet noch sehr viele, ihrem Wesen nach ganz und gar ungeklärte Punkte gab und gibt, so haben wir von vornherein alle Versuchsarbeit, die auf irgend welchen einzelnen Ideen und Einfällen beruhte, fallen gelassen und haben uns, um zu einer grundsätzlichen Klärung zu kommen, der Grundlagenforschung zugewandt und dabei die Entwicklung der zu diesem Zwecke erforderlichen Versuchs- und Meßeinrichtungen ganz besonders ernst genommen; als Bestätigung für die bei diesen Forschungen erhaltenen Ergebnisse haben wir dann die praktischen Versuche und Prüfungen am Motor wiederholt.

In dieser Weise ist ja auch in seiner langen Geschichte der Motor mit hin- und hergehendem Kolben durch eine Unzahl von Versuchen vervollkommenet worden, seine Betriebsdaten und sein Mechanismus sind immer wieder geändert und verbessert worden und viele Jahre waren notwendig, bis die

Brennkraftmaschine endlich fabrikationsreif war; wenn wir nun heute daran denken, daß diese lange Entwicklung des Kolbenmotors alles andere als einfach war, so wird wohl niemand behaupten, daß für die Entwicklung des Kreiskolbenmotors bei unserer Firma unter ganz und gar anderen Voraussetzungen 5 Jahre ausreichen konnten.

Wir haben bei der Entwicklung des Wankel-Motors von vornherein viel Kritik und auch viel eigene Zweifel auf uns nehmen und überwinden müssen, und der Blick auf den Kolbenmotor, der in seiner praktischen Anwendung die höchste Grenze erreicht hatte, machte die Bewertungsgrundlage für den Kreiskolbenmotor sehr bitter, und es blieb uns gar nichts anderes übrig, als eben die Dichte unserer Entwicklung auf das höchstmögliche Maß zu steigern.

Unsere Firma hat bekanntgegeben, daß sie seit diesem Jahre einen Wagen mit eingebautem Wankel-Kreiskolbenmotor herstellt und zum Verkauf bringt.

Selbstverständlich kann zur Zeit von einer vollständigen Ausnützung des Wankel-Motors noch keine Rede sein, wir sind jedoch der Ansicht, daß wir mindestens bereits über die Stufe hinausgekommen sind, auf der noch über die Möglichkeit einer praktischen Verwendung des Wankel-Motors diskutiert wurde.

Das allgemeine Prinzip der Konstruktion des Wankel-Motors ist bereits in zahlreichen Veröffentlichungen besprochen worden, und auch über die besonderen Merkmale der Konstruktion des von unserer Firma entwickelten Kreiskolbenmotors ist in technischen Zeitschriften bereits ausführlich berichtet worden <sup>1,2)</sup>, in der vorliegenden Arbeit sollen nun in

der Hauptsache unsere eigenen Gedanken zu den strittigen Punkten dargelegt werden, auf welche bisher hinsichtlich der praktischen Brauchbarkeit des Wankel-Motors immer hingewiesen wurde, und es soll der heutige Stand der Wankel-Motorentwicklung in unserer Firma aufgezeigt werden.

## 2. Die Kühlung

### 2.1 Die thermischen Formveränderungen

Da im Wankel-Motor die von den Gasen beaufschlagten Teile im Gehäuse auf ganz bestimmte Stellen jeweils beschränkt sind, so haben wir im Gehäuse keine gleichförmige Temperaturverteilung, es könnte sich deshalb leicht die Frage ergeben, ob es überhaupt möglich ist, im Hinblick auf die durch die ungleichmäßige Temperaturverteilung bedingten thermischen Formveränderungen eine genaue Abdichtung der Gase und des Öles zu erreichen. Zunächst hat die Differenz der radialen Ausdehnung der Trochoiden-Kurve eine radiale Bewegung bei den Scheiteldichtungen zur Folge, dies ist jedoch eine Frage, welche mit der Konstruktion der Scheiteldichtungsfedern zusammenhängt und es besteht kein tieferer Zusammenhang dieses Problemes mit der Arbeit des Motors.

Demhingegen ist vielmehr der Einfluß der maximalen Temperatur der Trochoidenfläche auf die Beschaffenheit des Ölfilmes von großer Wichtigkeit, da nämlich die Temperatur der Trochoidenfläche höher ist als die Temperatur des Seitengehäuses; außer der Kühlung, bei welcher man den Zweck verfolgt, diese maximale Temperatur abzusenken, spielt hierbei auch das Material des Läufergehäuses eine große Rolle.

Dies ist auch der Grund, der uns dazu bewogen hat, als Ergebnis unserer Versuche als Material Aluminium zu wählen.

Andererseits haben wir uns hinsichtlich der im Seitengehäuse zu erwartenden Formveränderungen überlegt, ob nicht etwa dadurch nachteilige Wirkungen auf die Gasdichtungen und auf die Öldichtungen der Läuferseitenflächen hervorgerufen werden.

Selbstverständlich wollen wir hierbei eine Konstruktion, welche so ausgelegt ist, daß ganz extreme thermische Formveränderungen auftreten, von vornherein außer Betracht lassen, im Zusammenhang mit diesem Punkte gehen unsere Überlegungen jedoch dahin, ob hierbei nicht der Kühlung und der Konstruktion des Gehäuses einerseits und den konstruktiven Daten der Dichtungselemente der Läuferseitenflächen andererseits eine wichtige Bedeutung zukommt oder nicht.

Da es sich theoretisch betrachtet bei diesen thermischen Formveränderungen darum handelt, diese Formveränderungen auf ein Mindestmaß zu reduzieren und gleichzeitig diesen Formveränderungen entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, haben wir uns gedacht, daß wir ein Beispiel einer ganz ähnlichen Beziehung zwischen dem rotierenden Ventil und dem Ventilsitz bei den Auspuffventilen eines Viertakt-Kolbenmotors haben.

Jedenfalls wurde in unserer Firma die Entwicklung in der Weise vorwärts getrieben, daß man bei der Form den gegenseitigen Zusammenhang der Kühlung des Gehäuses einerseits und der Konstruktion der Dichtungselemente andererseits berücksichtigt hat.

## 2.2 Die Vorwärmung des Gehäuses

Was im Zusammenhang mit der Kühlung des Motors ganz besonders beachtet werden muß, daß ist einmal eine möglichst weite Absenkung der Temperatur der besonders stark wärmebelasteten Teile, und andererseits eine mit allen Mitteln zu erstrebende Verringerung der Temperaturdifferenzen über den gesamten Umfang des Läufergehäuses.

Ein Verfahren zur Verringerung der Temperaturdifferenzen im Gehäuse des Wankel-Motors ist von unserer Firma untersucht worden und es besteht darin, daß man diejenigen Teile des Gehäuses, in welchen die niedrigere Temperatur herrscht, durch die Auspuffgase vorwärmen läßt.

Der Niedertemperaturteil eines Wankel-Motors ist derjenige Teil, welcher der unteren Totpunktansauglage entspricht; dieser Teil erfährt dauernd eine Kühlung von innen durch die latente Wärme des Ansauggasgemisches, ein allzu tiefes Absinken der Temperatur dieses Teiles dürfte jedoch unserer Meinung nach auf das Problem der bereits oben erwähnten thermischen Formveränderung des Gehäuses und insbesondere auf die Vernebelung des Gasgemisches und auf die Schmiereigenschaften der Gleitflächen einen schlechten Einfluß ausüben.

Wie bereits in anderen Zeitschriften dargelegt worden ist, hat unsere Firma bei ihrem Motor für diese Niedertemperaturteile (sowohl im Läufergehäuse, wie auch im Seitengehäuse) unter Ausnützung eines Teiles der Auspuffgase ein Vorwärmssystem entwickelt, über dessen Einfluß auf die Temperaturverteilung im folgenden Abschnitt berichtet werden soll.

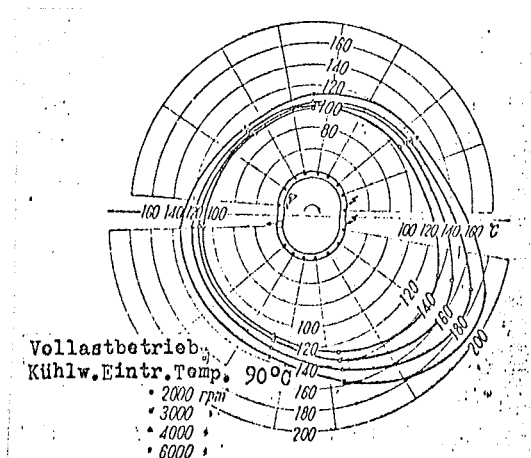


Abb.1 Die Temperaturverteilung im Läufergehäuse (in diesem Falle war der Mantel des Niedrigtemperaturteiles von Wasser durchströmt)

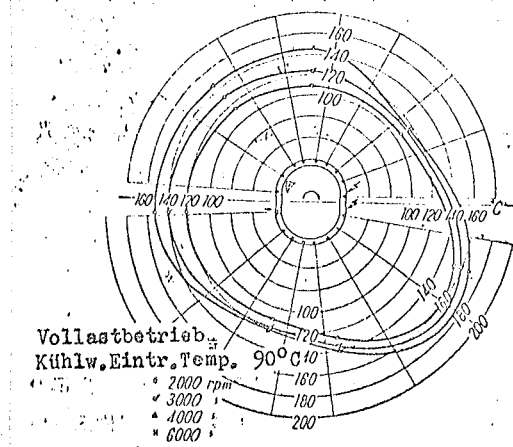


Abb.2 Die Temperaturverteilung im Läufergehäuse (in diesem Falle war der Mantel des Niedrigtemperaturteiles von den Abgasen durchströmt)

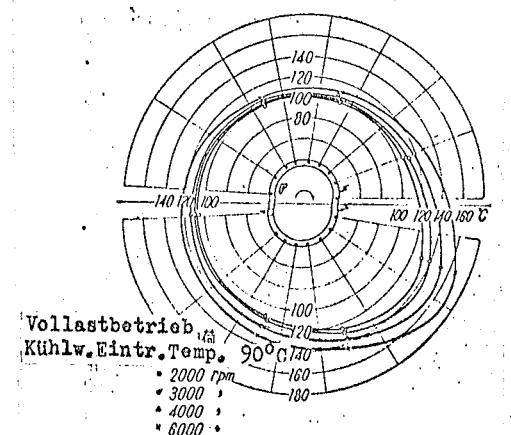


Abb.3 Die Temperaturverteilung im Seitengehäuse (in diesem Falle war der Mantel des Niedrigtemperaturteiles von Wasser durchströmt)

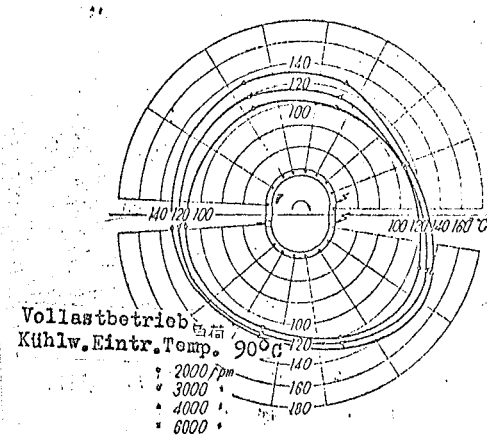


Abb.4 Die Temperaturverteilung im Seitengehäuse (in diesem Falle war der Mantel des Niedrigtemperaturteiles von den Abgasen durchströmt)

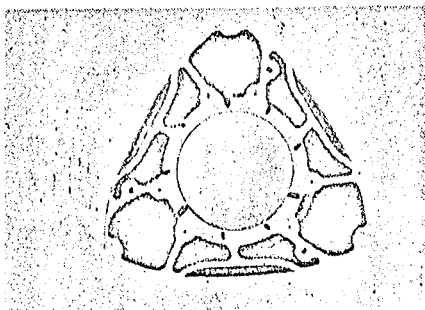


Abb.5 Das Innere des Läufers

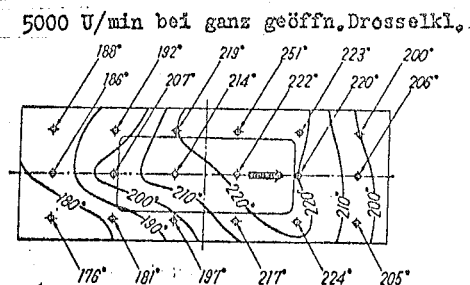


Abb.6 Die Temperaturverteilung im Läufer

### 2.3 Die Temperaturverteilung im Gehäuse

Die Abb.1-4 zeigen die Ergebnisse der bei unserer Firma durchgeführten praktischen Messungen der Temperaturverteilung im Läufergehäuse und im Seitengehäuse.

Sämtliche Temperaturen sind in 1 mm Abstand von den Gleitflächen im Innern des Gehäuses gemessen worden.

Ganz allgemein lassen sich bei den einzelnen Teilen einer Brennkraftmaschine Temperaturdifferenzen und thermische Formveränderungen bis zu einem gewissen Grade gar nicht vermeiden, es scheint uns jedoch, daß durch eine Gesamtbeurteilung abgewogen werden muß, inwieweit die thermischen Formveränderungen beim Betrieb der miteinander zusammenwirkenden Teile einen praktischen Schaden hervorrufen, und inwieweit der Wert der Arbeit des Motors insgesamt eine Beeinflussung erfährt.

Inwieweit die bei dem Wankel-Motor unserer Firma praktisch gemessenen Temperaturdifferenzen in der Praxis problematisch sind, dies muß selbstverständlich vom praktischen Betrieb des Motors her und von der dabei erzielten Lebensdauer her beurteilt werden; praktisch ist jedoch eine mehr oder weniger gründliche und tiefgehende Beurteilung in dem Inhalt unserer nachfolgenden Darlegungen enthalten.

### 2.4 Die Kühlung des Läufers

Ganz allgemein ist bei allen Kreiskolbenmotoren die Kühlung des Läufers außerordentlich wichtig und gleichzeitig konstruktiv sehr schwierig.

Wenn der Läufer nicht ausreichend gekühlt wird, dann sind ein Fressen der Dichtungsteile in den Dichtungsritzen, ein Festkleben der Dichtungsteile an den Gleitflächen des

Gehäuses oder aber die Entstehung von heißen Punkten auf der Läuferverbrennungsfläche und damit unregelmäßige Zündungen und viele andere Störungen die unvermeidlichen Folgen.

Wie wir dies vielen, bisher in der Fachliteratur erschienenen Berichten entnehmen können, hat sich beim Läufer des Wankel-Motors eine Konstruktion sehr gut bewährt, bei welcher der Läufer von innen her durch Zirkulieren des Öles gekühlt wird.

Damit jedoch das Öl im Innern des Läufers seine Kühlwirkung mit gutem Wirkungsgrad erreicht und vollständig aus dem Läufer wieder nach außen ausströmt, ist die Konstruktion des Läuferinneren von großer Wichtigkeit und gleichzeitig ist es nicht nur für die Kühlung, sondern auch im Hinblick auf den ruhigen Lauf des Motors (engine balance) von entscheidender Bedeutung, daß die richtige Menge des Öles von den Lagern her dem Inneren des Läufers zuströmt; diese Punkte müssen deshalb mit großer Sorgfalt und Vorsicht überwacht werden.

Die Abb.5 zeigt den heutigen Aufbau der inneren Form des Läufers.

Im Zusammenhang mit der Kühlung des Läufers ist es natürlich sehr wichtig zu entscheiden, welches Material das richtige ist, Gußeisen oder Aluminium, von diesen beiden Werkstoffen hat jeder seine Vorteile und seine Nachteile, bei den in unserer Firma durchgeführten Versuchen hat sich ergeben, daß man im großen und ganzen beim Gußeisen praktisch die geringeren Schwierigkeiten hat, und wir haben deshalb Läufer aus Gußeisen angewandt.

Die Abb.6 zeigt ein Beispiel der bei der Messung der Oberflächentemperatur dieses Läufers erhaltenen Meßergebnisse

### 3. Die Schmierung

#### 3.1 Die Schmierung der Gasdichtungen

Beim Kreiskolbenmotor wird allgemein angenommen, daß der Schmiermechanismus seiner Dichtungsteile sich grundsätzlich von der Schmierung der Kolbenmotoren unterscheidet und daß er in technischer Hinsicht einen außerordentlich schwierigen Punkt darstellt.

Ganz am Anfang hat man auch bei dem von unserer Firma entwickelten Motor mit Kraftstoffgemischen, die von Fall zu Fall verschieden waren, und 50:1 oder 100:1 betrugen, Versuche durchgeführt, praktisch verhielt es sich jedoch so, daß man es durchaus nicht immer für notwendig hielt, den Motor unserer Firma mit Kraftstoffgemisch zu betreiben.

Dies hatte seinen Grund darin, daß man annahm, daß das Lecken des Öles von den Seitenflächen des Läufers ganz beträchlich war, und daß allein schon diese Leckölmenge als Schmierölmenge für die Schmierung der inneren Teile des Motors mehr als genug sei.

Ganz im Anfang konnte <sup>man</sup> (jedoch das Problem des von den Scheiteldichtungen herrührenden wellenförmigen Abriebverschleißes der Trochoidengleitflächen und des schrägen Abriebverschleißes der Scheiteldichtungsspitzen, obwohl auf diese Weise große Mengen von Schmieröl zugeführt wurden, nicht lösen.

Dies hatte seinen Grund darin, daß man annahm, daß diese Schmierung dadurch charakterisiert sei, daß durch die Form

der Scheiteldichtungen und durch ihren Arbeitsmechanismus der Ölfilm der einander berührenden Teile zerstört werde, und daß deshalb als natürliches Ergebnis dieser Zerstörung des Ölfilmes eine Berührung zwischen Metall und Metall zustande komme.

Ganz allgemein kann man bei Hochgeschwindigkeitsgleitflächen von Metall auf Metall schon im Hinblick auf die Lebensdauer ohne Schmierung nicht auskommen, bei den Berührungsflächen der Scheiteldichtungen eines Wankel-Motors jedoch ist es vom Mechanismus dieser Schmierung her gesehen überaus schwierig, den sogenannten idealen Ölfilm zu erwarten.

Daraus haben wir also die Schlußfolgerung gezogen ( und hierüber soll später noch im Abschnitt über die Lebensdauer berichtet werden), daß die Kombination der Metalle, bei welchen wir die Schmierung dieser Teile zur absoluten Bedingung machen, praktisch gesehen nicht vernünftig ist.

So kam es, daß wir uns schließlich entschlossen, für die Scheiteldichtungen ein Kohlematerial zu nehmen.

Da das Kohlematerial selbst bekanntlich selbstschmierende Eigenschaften besitzt, so stellt das Schmieröl als reibungsverringendes Mittel kein allzu großes Problem mehr dar; da jedoch das Motorenschmieröl auch eine Wirkung als gasdichtendes Mittel besitzt, so mußte die Schmierung der Scheiteldichtungsteile eher vom Gesichtspunkt der Gasdichtung her berücksichtigt werden.

Durch Versuche ist bestätigt worden, daß, obwohl bei einer Scheiteldichtung aus Kohlematerial die sich berührenden Teile geometrisch eine Linienberührung aufweisen, das Vor-

handensein oder Nichtvorhandensein einer Schmierung einen Einfluß auf die Gasdichtheit ausübt.

Ganz allgemein lassen sich, wenn man den Scheiteldichtungen eines Wankel-Motors Schmieröl zuführt, verschiedene Verfahren der Zuführung denken; einmal kann man den gemischten Kraftstoff verwenden, oder man kann je nach Bedarf die an den Läuferseitenflächen durchleckende Schmierölmenge automatisch steuern, oder aber man kann dem angesaugten Gasgemisch Öl zuführen.

Die Methode des Kraftstoffgemisches stellt zwar eines der Verfahren dar, die jeweils gebrauchte Schmierölmenge ist jedoch durchaus nicht immer proportional zu der Kraftstoffzuströmmenge, und außerdem ist die Verwendung eines Kraftstoffgemisches für einen modernen Kraftfahrzeugmotor nicht geeignet.

Eine Steuerung der Leckölmenge von den Läuferseitenflächen her, welche allen Betriebsbedingungen entspricht, ist nahezu unmöglich.

Schließlich hat man durch die Entwicklung einer Öldichtung bei unserer Firma die Schmierölleckmenge von den Seitenflächen des Läufers her auf das äußerste Maß eingedämmt, und außerdem ein Verfahren entwickelt, nach welchem den jeweiligen Betriebsbedingungen des Motors entsprechend die erforderliche Schmierölmenge getrennt in die Vergaseröffnung zugeführt wird. Dieses Schmierölsystem ist in der Abb.7 dargestellt.

Da die Ölzumepumpe in der Abbildung den Zweck hat, den Gasdichtungen Schmieröl zuzuführen, so ist ihre maximale Fördermengencharakteristik aus dem Kennwert der Gasdich-

tung bei vollständig geöffneter Drosselklappe experimentell bestimmt worden.

Andererseits hat die sich auf die sich an den Seitenflächen des Läufers befindenden Seitendichtungen beziehende Schmierölaufuhr den Zweck einer Gasdichtung und gleichzeitig eines Reibungsverringermittels, jedoch spielen die oben erwähnte getrennte Ölaufuhr und die von den Seitenflächen her ausleckende Ölmenge keine sehr wichtige Rolle

Dies hat seinen Grund darin, daß wie beim Kolbenmotor der obere Kolbenring (top ring) durch den nach dem Vorbeistreichen des zweiten Kolbenringes und des Ölabstreifringes zurückbleibenden sehr dünnen Ölfilm in ausreichendem Maße geschmiert wird, auch die Seitendichtungen beim Wankelmotor immer auf dem von den Öldichtungen nach ihrem Vorbeistreichen zurückgelassenen Ölfilm laufen.

Die Art der Bewegung der Seitendichtungen bei einem Wankelmotor ist grundverschieden von der Art der Bewegung der Kolbenringe eines Kolbenmotors, welche in der oberen Totpunktslage abgestoppt wird; und da man in der einen Richtung zwar eine kontinuierliche Bewegung hat, die jedoch durchaus nicht immer einfach ist, so ist es ganz natürlich daß es in der Praxis bei der Kombination mit den Gleitflächen sowohl hinsichtlich der Konstruktion, wie hinsichtlich der Fertigung und des Materiales keineswegs ohne größere Schwierigkeiten abgeht.

### 3.2 Die Öldichtungen und der Ölverbrauch

Wenn man für die Läuferkühlung Öl verwendet und in den Läuferlagern eine zwangsläufige Schmierung anwendet, wird gegen die Gleitflächen der Läuferseiten und des Seitenge-

häuses eine erhebliche Menge Öl ausgespritzt, und da dieses Öl unter der Einwirkung der durch die Drehbewegung des Läufers erzeugten Fliehkraft steht, so kommt der Arbeit der Öldichtungen, welche die Aufgabe haben, ein Auslecken des Öles nach dem Innern der Verbrennungskammer hin zu verhüten, praktisch eine außerordentlich wichtige Bedeutung zu.

In der Anfangszeit waren offen gestanden auch bei dem Kreiskolbenmotor unserer Firma diese Öldichtungen unvollkommen und der damit verbundene Ölverbrauch konnte auf keinen Fall zugelassen werden.

Der Mechanismus dieser Öldichtungen auf den Läuferseitenflächen mag auf den ersten Blick ganz einfach erscheinen, die Entwicklung der Öldichtungen war aber in unserer Firma eines vom schwierigsten.

Der Grund hierfür ist darin zu suchen, daß außer den mechanischen und thermischen Formveränderungsbedingungen, welche bei den Gleitflächen des Seitengehäuses als ganz selbstverständlich und natürlich angesehen werden, die Arbeitsbedingungen der Öldichtungen selbst und die an sie gestellten Bedingungen ganz und gar nicht einfach sind.

Andererseits kann man vernünftigerweise nicht erwarten, daß die Seitendichtungen als Öldichtungen arbeiten.

Im Laufe der Entwicklung der Öldichtungen bei unserer Firma hat man zunächst durch Rechnung und Messungen eine Analyse der grundlegenden Erscheinungen aufgestellt und von dieser Analyse ausgehend hat man die Vorentwürfe der einzelnen Dichtungen geprüft, heute glauben wir jedoch, daß wir mit unseren Entwicklungen auf einer Stufe angelangt sind, welche eine für die Praxis ausreichende Lebens

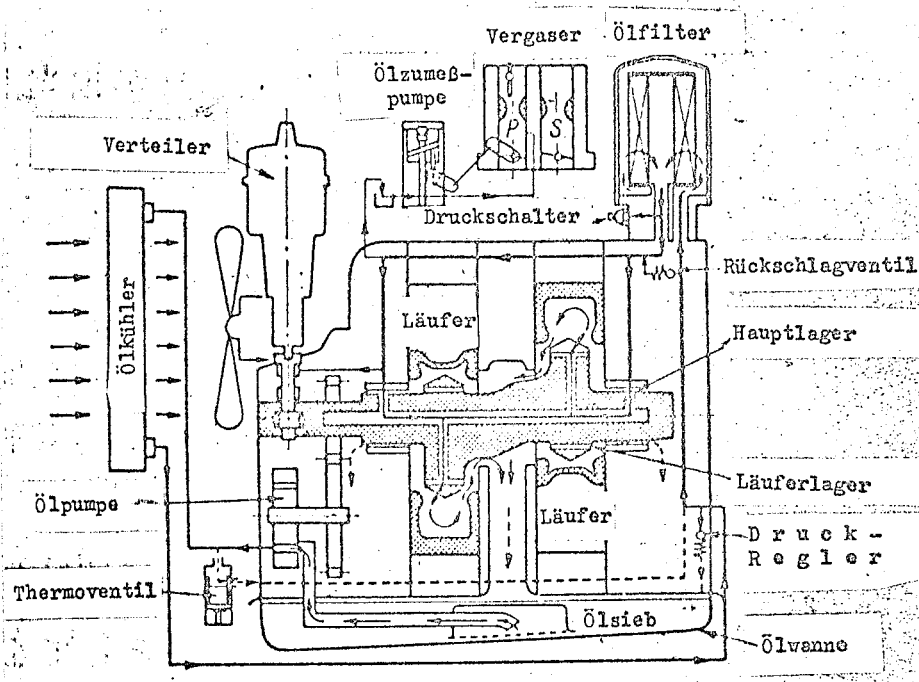


Abb.7 Das Schmiersystem

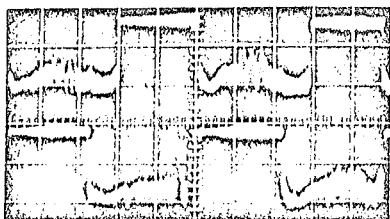


Abb.8 Die Bewegung der Öldichtung

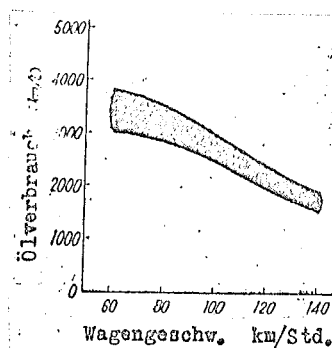


Abb.9 Der Ölverbrauch

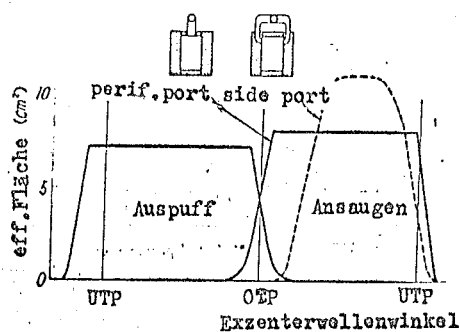


Abb.10 Zeit-Flächen-Diagramm der Ansaug- und Auspuff-Öffnungen

dauer der Dichtungen verspricht.

Die Abb.8 zeigt ein Beispiel der Meßergebnisse, die man mit einer Spezialmeßeinrichtung erhalten hat und bei der es darauf ankam herauszufinden, welcher Art die erhebliche Bewegung ist, welche die Öldichtung bei ihrer Arbeit gegenüber dem mit ihr in Berührung stehenden Seitengehäuse ausführt.

Während der Drehbewegung des Läufers entfernt sich ein Teil der Öldichtung von der Seitengehäusefläche, gleichzeitig nähert sich der andere Teil der Seitengehäusefläche diese Erscheinung haben wir ganz klar und deutlich erfaßt.

Der Ölverbrauch beim praktischen Betrieb des Motors unserer Firma wurde in der Hauptsache durch die von der Ölzumepumpe getrennt zugeführte Ölmenge und durch das an den Öldichtungen der Läuferseiten durchströmende Öl bestimmt, neuerdings wird jedoch der Ölverbrauch bei der praktischen Fahrt des Wagens, in dem der Motor eingebaut ist, gemessen, dieser Ölverbrauch ist in der Abb.9 graphisch dargestellt.

#### 4. Die Verbrennung

##### 4.1 Das Ansaugsystem

Bei der als normale Bauform eines Wankel-Motors ganz allgemein bekannten Konstruktion hat man gewöhnlich die Ansaugöffnung in Form einer entlang dem Läufergehäuse verlaufenden peripheren Öffnung (peripheral port), praktisch gibt es jedoch auch noch die sogenannten Seitenöffnungsmotoren, bei denen außerdem auch noch am Seitengehäuse Ansaugöffnungen vorhanden sind.

Auch bei unserer Firma hat man in der Anfangszeit die

ersten Versuche ausschließlich mit Umfangsöffnungen (peripheral port) durchgeführt, heute jedoch werden in unserer Firma die Seitenöffnungsbauart und die Kombinationsöffnungsbauart (combination ports), bei welcher man die Seitenöffnung und die Umfangsöffnung kombiniert hat, in der Hauptsache geprüft.

Von diesen beiden Bauarten hat zwar jede ihre Vorteile und ihre Nachteile, die Umfangsöffnungsbauart (peripheral port) ist im besonderen dann geeignet, wenn hohe Drehzahlen und hohe Leistung verlangt werden, während der besondere Vorteil der Seitenöffnungsbauart darin besteht, daß man bei niedrigen Drehzahlen, einschließlich der Leerlaufdrehzahl und bei niedrigen Belastungen eine stabile Verbrennung bekommt und es ist gerade bei dieser Bauart verhältnismäßig leicht, die richtige Öffnungszeiteinstellung (port timing) zu wählen, wenn es sich darum handelt, bei niedriger Drehzahl den Volumenwirkungsgrad zu erhöhen.

Die Abb.10 zeigt als Vergleich den Verlauf der Zeit-Flächen-Diagramme für diese beiden grundsätzlichen Ansaugöffnungsbauarten; was einem hierbei besonders auffällt, ist der große Unterschied in der Überlappung.

Die Tatsache, daß man selbst bei der Seitenöffnungsbauart welche als die Bauart für die niedrigsten Drehzahlen bezeichnet wird, ein Zeit-Flächen-Diagramm nehmen kann, das der Ansaugung bei hohen Drehzahlen entspricht, ist ein ganz besonderes Merkmal des Wankel-Motormechanismus, wodurch sich der Wankel-Motor vom Motor mit hin- und hergehenden Kolben, welcher zwischen Ventilöffnungs- und Schließzeiten und Ventilhub mechanisch begrenzt ist, unterscheidet; hiermit hängt es zusammen, daß der Arbeitszyklus

winkel des Wankel-Motors das 1,5fache desjenigen des Motors mit hin- und hergehendem Kolben beträgt.

Bei einem Wankel-Motor mit seitlichen Ansaugöffnungen ist es also möglich, einerseits die Zeiteinstellung der Ansaugöffnung (port timing) für niedrige Drehzahlen zu wählen, und dadurch, daß man andererseits einen Überschuß des Ansaugzeitflächendiagrammes hat, welcher bis zu einem gewissen Grade auch den hohen Drehzahlen gewachsen ist, den Betriebsdrehzahlbereich zu erweitern.

Ein anderer bemerkenswerter Unterschied zwischen der Bauart mit seitlichen Ansaugöffnungen und der Bauart mit Ansaugöffnungen am äußeren Umfang (peripheral port) besteht in der Turbulenz des angesaugten Gasgemisches; man hat diesen Zustand bei einem Motor mit durchsichtigem Seitengehäuse unter Verwendung schmaler Aluminiumfolienstreifen als "tracer" mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen, Beispiele dieser Aufnahmen werden in den Abb. 11 und 12 gezeigt.

Das Bild (pattern) des Bewegungszustandes dieser angesaugten Gase ist auch verschieden, je nach der Form des im Läufer vorgesehenen Verbrennungsraumes, wie die Abbildungen zeigen, ist die Turbulenz der Ansauggase bei einem Motor mit seitlicher Ansaugöffnung wesentlich heftiger als bei einem Motor mit peripherer Ansaugöffnung; es ist anzunehmen, daß diese Turbulenz eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Vernebelung des Gasgemisches und auf die Bildung eines gleichförmigen Gasgemisches spielt.

Über diese Fragen ist zwar schon in anderen technischen Zeitschriften berichtet worden, bei einem Motor mit

doppelter seitlicher Ansaugöffnung jedoch ist es möglich, beim Betrieb die eine Ansaugöffnung auf die Ansaugleitung für die niedrigen Drehzahlen und die andere Ansaugöffnung auf eine Ansaugleitung für die hohen Drehzahlen aufzuteilen und es ist ganz klar, daß man dadurch dann die Möglichkeit hat, die Geschwindigkeit der angesaugten Gase je nach den jeweiligen Betriebsbedingungen in der geeigneten Weise aufrechtzuerhalten; dies dürfte einer der wichtigsten Vorzüge des Wankel-Motors sein.

#### 4.2 Die Gasdichtungen

Von den problematischen Punkten beim Wankel-Motor ist es ganz besonders die Funktion der Gasdichtungen, die der Kritik unterliegt.

Diese Kritik bezieht sich vor allem auf die Lebensdauer und auf die Gasdichtheit der Gasdichtungen. Hierzu haben wir zwar schon mehr oder weniger in dem Abschnitt über die Schmierung Erklärungen gegeben, was jedoch die Lebensdauer anbelangt, so wird hierüber in dem Abschnitt über die "Lebensdauer" gesprochen werden und deshalb wollen wir hier über die Gasdichtheit einiges zu sagen versuchen.

Es ist eine Tatsache, daß der Mechanismus der Gasdichtung eines Wankel-Motors sowohl durch die Länge der Dichtung, wie auch durch die Anzahl der abzudichtenden Spalten, sowie durch die Form der Gasdichtung und durch die Bedingungen, unter denen sie zu arbeiten hat, im Vergleich mit einem Kolbenmotor wesentlich ungünstiger ist; weiterhin beträgt der Arbeitszykluswinkel das 1,5fache des Winkels bei einem Viertaktmotor mit hin- und hergehendem Kolben, und insbesondere läßt es sich nicht leugnen, daß bei nied-

rigen Drehzahlen die Funktion der Gasdichtung ungünstig ist.

Der Zweck der Gasdichtung besteht zwar darin, den normalen Betrieb des Motors aufrechtzuerhalten und dafür zu sorgen, daß er seine Leistung abgibt; diese Bedingungen des Motors werden jedoch durchaus nicht immer allein durch die Funktion der Gasdichtung bestimmt, und deshalb müssen wir als ganz selbstverständlich erwarten, daß auch die Funktion der Gasdichtung in ihrer praktischen Anwendung als einer der Faktoren beim praktischen Betrieb des Motors und bei der Entwicklung seiner Leistungsfähigkeit diskutiert werden muß.

Wir sind der Ansicht, daß eine Diskussion über die Frage, ob der Mechanismus der Gasabdichtenden Wirkung, die Vorteile und Nachteile der Gasdichtung für die praktische Brauchbarkeit mitbestimmend sind oder nicht, im Hinblick auf die praktische Brauchbarkeit des ganzen Motors keinen Sinn hat.

Zum Vergleich zeigen wir in der Abb. 13 ein Beispiel der Leistung des Motors unserer Firma bei voll geöffneter Drosselklappe.

Ganz allgemein wird die Leistungsfähigkeit der Gasdichtung eines Wankel-Motors im Hinblick auf das Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen leicht kritisch beurteilt, die in der Abb. 13 gezeigten Leistungskennlinien sind jedoch auch bei den niedrigen Drehzahlen den beim praktischen Betrieb des Motors gegebenen Bedingungen in ausreichendem Maße gewachsen und man hat deutlich den Eindruck, daß die Tendenz der Leistung im Bereich der hohen Drehzahlen ein ganz besonders günstiges Merkmal des Wankel-Motors ist.

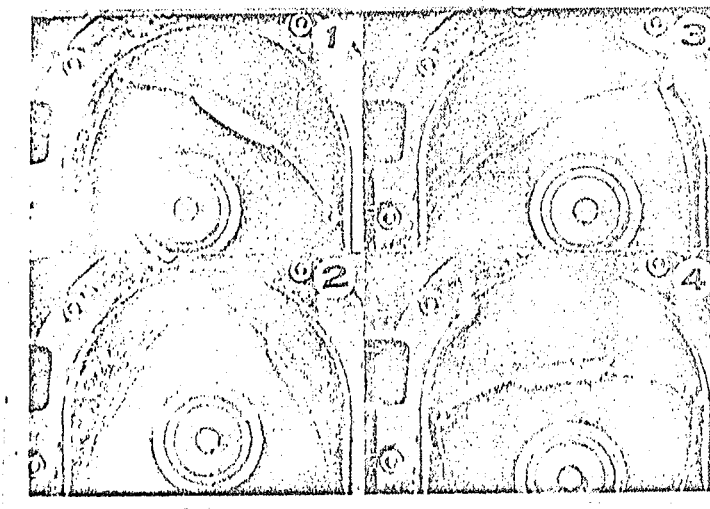


Abb.11 Die Bewegung der angesaugten Gase bei peripheren Ansaugöffnungen

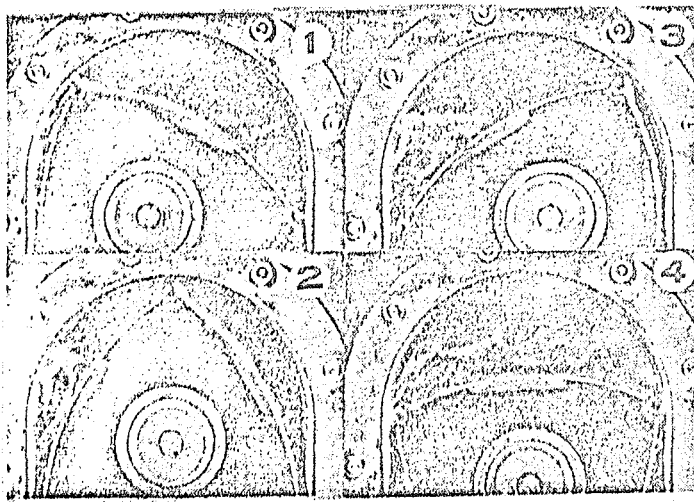


Abb.12 Die Bewegung der angesaugten Gase bei seitlichen Ansaugöffnungen

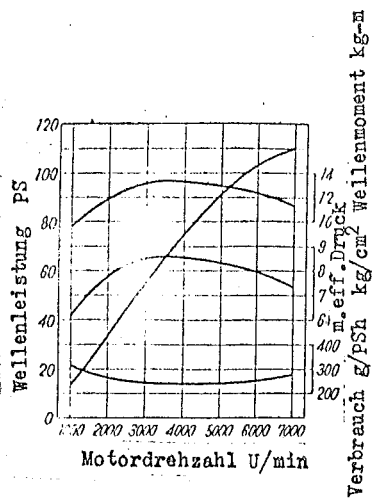


Abb.13 Die Leistungskennlinien bei vollständig geöffneter Drosselklappe für den Motor vom Typ 3846

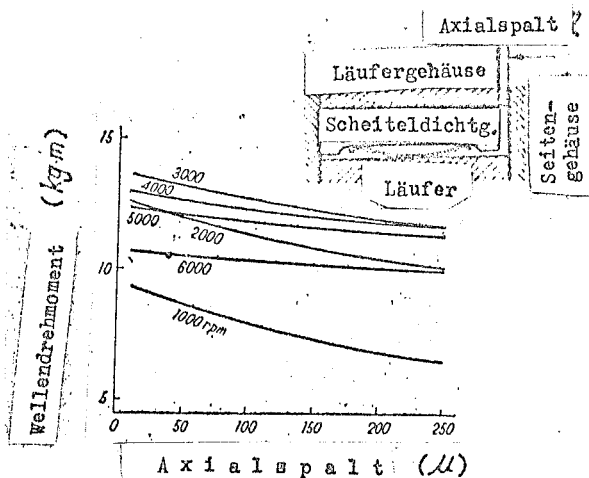


Abb.14 Die Beziehung zwischen der Leistung und dem Axialspalt der Scheiteldichtung

Man hat zwar gesagt, daß der lange Arbeitszykluswinkel des Wankel-Motors sich bei den niedrigen Drehzahlen auf die Leistung ungünstig auswirke, von der anderen Seite her betrachtet ist dies jedoch im Hinblick auf die Umwandlung des Drehmomentes ein günstiger Faktor, und die Tatsache, daß der Drehmomentumwandlungsprozentsatz eines Zweiläufer-Wankel-Motors denjenigen eines Sechszylinder-Viertaktmotor nahe kommt, ist bereits in anderen Zeitschriften eingehend dargelegt worden.

Auch die Leistungsfähigkeit der Gasdichtung eines Wankel-Motors ist, wie dies bei allen Brennkraftmaschinen der Fall ist, das Ergebnis der Gesamtheit vieler einzelner Bedingungen, sie ist also verschieden, je nach der Auslegung des Motors selbst, je nach dem Material und den Abmessungen der Dichtungen, je nach den Schmierbedingungen, je nach der Kühlung des Gehäuses und je nach der mehr oder weniger großen Genauigkeit der Bearbeitung; deshalb müssen selbstverständlich diese verschiedenen Bedingungen berücksichtigt werden und bei unserer Firma sind aus diesem Grunde sehr viele einzelne Versuche durchgeführt worden.

Ein Beispiel, welches deutlich zeigt, wie die Beschaffenheit und die Art des Aufbaus der Scheiteldichtung mit ihrer Dichtungsleistung zusammenhängen, haben wir in dem Einfluß des Axialspaltes.

Ein Beispiel der sich hierauf beziehenden Versuchsergebnisse haben wir in der Abb. 14 dargestellt, aus dieser Abbildung können wir entnehmen, daß dieser Einfluß des Spaltes umso schwächer wird, je höher die Drehzahl ansteigt.

Da die gasdichtende Funktion der Seitendichtung nicht nur

in hohem Maße die Leistung des Motors beeinflusst, sondern auch für das Durchblasen der Gase in den Ölsumpf des Gehäuses verantwortlich ist, so hat gerade dieses Durchblasen der Gase viel zu Zweifeln und zu Kritik am Wankel-Motor Anlaß gegeben.

Da sich bei dem Motor unserer Firma die Öldichtung auf der Innenseite der Seitendichtung befindet, so darf selbstverständlich bei der Beurteilung der Durchblasenden Gase die Funktion der Öldichtung nicht vernachlässigt werden.

Obwohl die Funktionen der Seitendichtung und der Öldichtung die gleichen sind, ist doch die Belastung der Öldichtung im Zusammenhang mit dem Durchblasen bei einem Motor mit seitlicher Ansaugöffnung (side port) ungleich viel einfacher und leichter als im Falle eines Motors mit peripherer Ansaugöffnung (peripheral port). Der Grund hierfür ist darin zu suchen, daß bei einem Motor mit seitlicher Ansaugöffnung, da ja diese Ansaugöffnung zwischen der Seitendichtung und der Öldichtung gelegen ist, auch dann, wenn Gase vorhanden sind, welche durch die Seitendichtung hindurchgekommen sind, diese Gase wieder zur Ansaugöffnung zurückgesaugt werden, so daß der Druck am äußeren Umfang der Öldichtung niedrig gehalten wird.

Die Abb.15 zeigt ein Beispiel der bei dem Motor unserer Gesellschaft gemessenen Werte des Raumdruckes zwischen der Seitendichtung und der Öldichtung.

Jedenfalls ist heute bei dem Motor unserer Firma das Durchblasen der Gase zum Ölsumpf praktisch kein Problem mehr, das irgendwelche Schwierigkeiten bereitet.

#### 4.3 Die Teillastverbrennung

Wenn man einen Motor in ein Kraftfahrzeug einbauen will, dann ist es ganz klar, daß für einen solchen Motor die Teillastverbrennung, und insbesondere die Stabilität der Teillastverbrennung bei niedrigen Drehzahlen von ausschlaggebender Wichtigkeit ist; deshalb hat man bei unserer Firma in der Anfangszeit der Entwicklung dieses Motors eine intensive Forschung betrieben, weil gerade in diesem Punkt der Wankel-Motor noch ganz unbefriedigende Ergebnisse zeigte.

Die Stabilität dieser Teillastverbrennung hängt auf das innigste mit dem Ansaugsystem, mit der Zeiteinstellung der Ansaugöffnungen und der Auspufföffnungen, mit der Form der Verbrennungskammer, mit der Lage der Zündkerzen und mit der Beschaffenheit der Verbindungsöffnungen zusammen.

Die Abb.16 zeigt die mit einem Ionenspalt (ion gap) erhaltenen statistischen Aufzeichnungen der Schwankungen der Verbrennungsgeschwindigkeit bei 1000 U/Min. und  $P_e = 1.3 \text{ kg cm}^2$  für die Motoren unserer Firma mit seitlicher Ansaugöffnung bzw. mit kombinierten Ansaugöffnungen.

Die Messung der Entflammungsausbreitung mit Hilfe eines Ionenspaltes (ion gap) liefert zwar nicht immer genaue Ergebnisse, es läßt sich jedoch aus ihnen die allgemeine Tendenz erkennen.

Aus der Abbildung ersehen wir, daß bei einem Motor ohne Ventile mit kombinierten Ansaugöffnungen die Arbeit des Motors nahe an den Motor mit peripherer Ansaugöffnung heran kommt, daß jedoch beim Motor mit seitlicher Ansaugöffnung die Verbrennung stabiler ist.

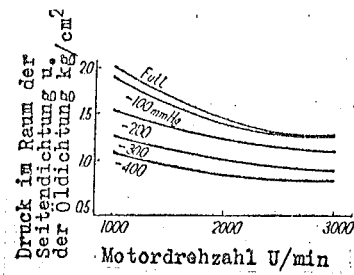


Abb.15 Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Gasdruck

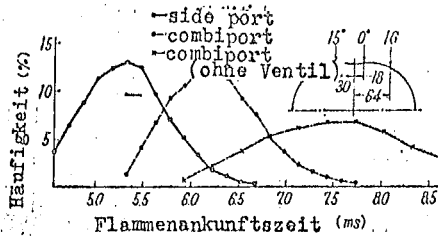


Abb.16 Die Schwankungen der Flammenankunftszeit

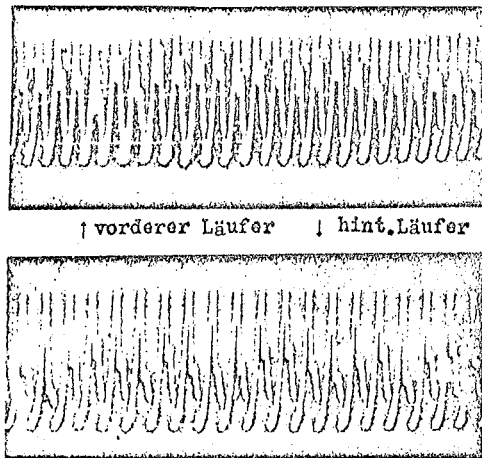


Abb.17 Die Druckwellenform bei Leerlauf (700 U/Min.)

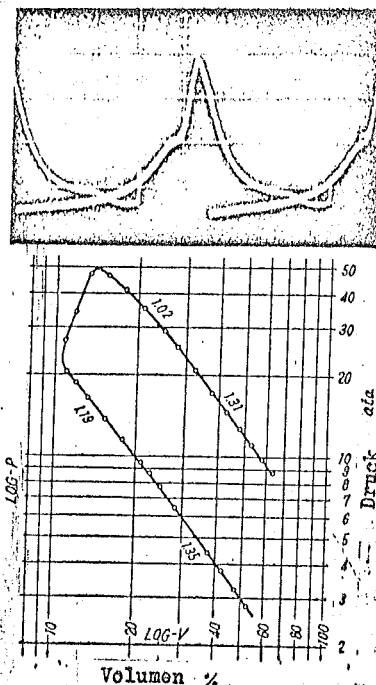


Abb.18 Das Vollastindikordiagramm (3400 U/Min.)

Die Abb.17 zeigt die Ergebnisse, die man bei der Messung der Druckwellenform bei Leerlauf in dem neuesten mit seitlichen Ansaugöffnungen versehenen Zweikammermotor unserer Firma erhalten hat. Die Leerlaufdrehzahl betrug 700 U/Min die beiden Fotos zeigen die in den beiden Läufern gleichzeitig aufgenommenen Druckdiagramme.

#### 4.4 Ein Beispiel der thermodynamischen Analyse

Die Abb.18 zeigt das Ergebnis der Druckwellenmessung, sowie das logarithmische Diagramm bei Vollastbetrieb und 3400 U/Min. für den Motor unserer Firma.

Die Abb.19 zeigt zum Vergleich ein Beispiel der Ergebnisse der Wärmebilanz, die man aufgrund von Messungen der Wärmemengen erhalten hat.

Bei der Erforschung der Verbrennung ist es von größter Wichtigkeit, daß man viele verschiedene Meßergebnisse unter Änderung der die Verbrennung beeinflussenden Faktoren erhält und daß man außerdem eine entsprechende Versuchseinrichtung für die Grundlagenforschung entwickelt; jetzt geht unser Bestreben noch dahin, die Genauigkeit dieser Messungen soweit als irgend möglich zu erhöhen.

#### 4.5 Die Auspuffgase

Unter den giftigen Bestandteilen der Auspuffgase eines Kraftfahrzeugmotors, welche in der neueren Zeit zum großen Problem geworden sind, der Anteil des Kohlenstoffmonoxydes je nach dem Luftkraftstoffverhältnis des Gasgemisches bald größer und bald kleiner ist, so kommt es vor allem auf die Frage an, wie mager das verwendete Luftkraftstoffgemisch eben noch sein kann, ohne daß dadurch die Stabilität der Verbrennung im Motor nachteilig beeinflusst wird.

Die wichtigsten Faktoren, von denen die Beschaffenheit des Gasgemisches beeinflußt wird, sind die Vernebelung des Kraftstoffes (die Vorwärmung des Gasgemisches und seine Geschwindigkeit in der Ansaugleitung), die Verteilung des Gasgemisches, die Turbulenz des Gasgemisches usw., alle diese Punkte liegen jedoch beim Wankel-Motor sehr günstig

Dadurch daß wir, wie bereits oben erwähnt wurde, in unserer Firma einen Motor mit doppelter seitlicher Ansaugöffnung entwickelt haben, so ist die Ansaugleitung in einen Primärteil und in einen Sekundärteil aufgeteilt, so daß man selbst bei niedrigen Drehzahlen in der Ansaugleitung die richtige Geschwindigkeit des Gasgemisches erhält außerdem kann die Gasgemischvorwärmung ausschließlich auf der Primärseite wirksam angeordnet werden, und wie bereits oben erwähnt wurde, wird den angesaugten Gasen durch die besondere Form der seitlichen Ansaugöffnung die geeignete Turbulenz mitgeteilt, und man hat die durch die bisherige Konstruktion des Wankel-Motors bedingte Turbulenz in der Nähe der oberen Kompressionstotpunktlage usw., dies alles sind Faktoren, durch welche die Beschaffenheit des Gasgemisches beim Wankel-Motor günstig beeinflußt wird.

Die mit der Konzentration der Kohlenwasserstoffe zusammenhängenden Faktoren sind bekanntlich nicht ganz einfach, als ihre wichtigste Entstehungsursache wird, wenn man von den Fehlzündungen und von dem Durchblaslecken zum Inneren der Auspufföffnungen hin absieht, die Flammenlöschende Wirkung in der Nähe der Wände der Verbrennungskammer angenommen.

Aus diesem Grunde ist natürlich das Verhältnis des Volu-

mens der Verbrennungskammer zu ihrer Oberfläche von große Wichtigkeit. Im Hinblick auf diesen Punkt muß man es allerdings in Kauf nehmen, daß der Wankel-Motor mit seiner flachen Form der Verbrennungskammer ungünstig ist.

Da weiterhin bei der Bewegung des Läufers vor und nach der oberen Totpunktlage in dem verzögerungsseitigen Raum der kurzen Trochoidenkurvenachse eine abschreckende (quenchin) Wirkung auftritt, so wird die Konzentrationsverteilung der noch nicht verbrannten Kohlenwasserstoffe in diesem Verzögerungsteil erwartungsgemäß höher.

Die Konzentration der Kohlenwasserstoffe in diesem Verzögerungsteil ist jedoch verschieden, je nach der Zeit, welche die Flammen brauchen, um zu diesem Teil zu gelangen (Flammenankunftszeit), und je nach dem Verhältnis des Volumens zur Fläche des in diesem Zeitpunkt in dem Verzögerungsteil gebildeten Verbrennungsraumes.

Im Zusammenhang mit dieser Konzentration spielen also die auf der Läuferseite gebildete Form der Verbrennungskammer, die Lage der Zündkerzen, der Zündvoreilwinkel wichtige Rollen, die bei unserer Firma in der neuesten Zeit erhaltenen Versuchsergebnisse zeigen ebenfalls ganz deutlich diese Wirkung.

Im Hinblick auf die noch nicht verbrannten Kohlenwasserstoffe haften dem Wankel-Motor zwar zweifellos geometrische Nachteile an, andererseits besitzt er jedoch auch dank seinem ganz besonderen Mechanismus interessante Vorzüge, welche geeignet scheinen, die genannten Nachteile zu lösen. Einer dieser Vorzüge besteht darin, daß die einzelnen ope-

rativen Teile des Wankel-Motors, so der Kompressionsteil, der Verbrennungsteil und der Auspuffteil jeder für sich eine ganz bestimmte und von den anderen getrennte Lage einnehmen und daß gleichzeitig, damit diese einzelnen operativen Teile in ihrer Phase kontinuierlich aufeinander folgen, an den entsprechenden Stellen des Gehäuses die beiden jeweils aufeinanderfolgenden Kammern periodisch miteinander verbunden werden und daß dadurch die Gasbewegung kontrolliert werden kann.

Dies bedeutet die Möglichkeit einer erneuten Verbrennung und einer zusätzlichen Verbrennung der noch nicht verbrannten Gase.

Ein weiterer Vorzug des Wankel-Motors besteht darin, daß die noch nicht verbrannten Gase durch Zufuhr von Sekundärluft oxydiert werden.

Da der Wankel-Motor eine Auspuffkammer besitzt, kann dem Inneren einer sich vor der Auspufföffnung befindenden Motorkammer Sekundärluft zugeführt werden; in diesem Punkte unterscheidet sich der Wankel-Motor ganz deutlich vom Kolbenmotor, bei welchem (diese Zufuhr von Sekundärluft?) sich praktisch leicht auf das Innere der Auspufföffnung begrenzen läßt (?).

Bei unserer Firma sind nun Hand in Hand mit einer gründlichen Erforschung der Verbrennungskammer, der Lage der Zündkerzen usw. die bereits oben besprochenen für den Wankel-Motor eigentümlichen und originellen Gegenmaßnahmen entwickelt worden, und wir sind laufend dabei, interessante Verbesserungen der einzelnen Werte zu erzielen.

## 5. Die Lebensdauer

### 5.1 Die Scheiteldichtungen und das Läufergehäuse

Wie dies bereits im Abschnitt 3.1 bis zu einem gewissen Grade dargelegt und erklärt wurde, entstand bei den Motoren der allerersten Zeit auf der Trochoidenfläche des Läufergehäuses ein wellenförmiger Abriebverschleiß. Dieser wellenförmige Abriebverschleiß ist keineswegs eine dem Wankel-Motor eigentümliche Erscheinung, das zunehmende Entstehen eines wellenförmigen Abriebverschleißes in eine Brennkraftmaschine bedeutet jedoch letzten Endes die Zerstörung der Gleitflächen und der Gasdichtungsflächen und es ist ganz klar, daß bei Vorhandensein eines derartigen Abriebverschleißes die praktische Verwendbarkeit eines solchen Motors verneint werden müßte.

Man hatte auch deutlich den Eindruck, daß das Entstehen dieses wellenförmigen Abriebverschleißes einer der wichtigsten Gründe für das allgemeine Fehlschlagen des Kreiskolbenmotors war.

Demzufolge hat man bei unserer Firma eine ganz intensive Forschung darauf gerichtet, diese Erscheinung von Grund auf zu klären.

Da man annahm, daß dieser wellenförmige Abriebverschleiß das Ergebnis einer Art von Hochfrequenzschwingungen sei, so hat man die Schwingungscharakteristik der Scheiteldichtungen und des Läufergehäuses, die Charakteristik der Reibung als der erregenden Kraft, den Einfluß der Schmierung, das Zusammenwirken von Gleitgeschwindigkeit und Berührungsdruk, den Anlagewinkel der Dichtung usw. durch viele Versuche eingehend und grundlegend untersucht. Zu diesem

Zweck haben wir nicht nur praktische Versuche am Motor selbst durchgeführt, sondern auch alle möglichen Versuchseinrichtungen entwickelt, welche der Messung der grundlegenden Erscheinungen dienen sollten.

Die von uns im Laufe einer langen Forschung und Entwicklung erhaltenen, sich auf den wellenförmigen Abriebverschleiß beziehenden Forschungsergebnisse sind nicht auf den Wankel-Motor allein beschränkt, sondern wir sind der Ansicht, daß sie für alle rotierenden Maschinen Gültigkeit haben, welche mit hoher Geschwindigkeit aufeinander gleitende Teile besitzen.

Während unserer Entwicklungsarbeiten haben wir einige Methoden zur Verringerung dieses wellenförmigen Abriebverschleißes untersucht und beurteilt, wir waren jedoch der Ansicht, daß es die praktische Verwendbarkeit des Motors als Handelsartikel in Frage stellen würde, wollten man mit Rücksicht auf die Lebensdauer des Läufergehäuses irgend welche Einschränkungen vorsehen.

Schließlich ist man bei unserer Firma zu der Auffassung gelangt, daß die Kombination von selbstschmierenden Eigenschaften besitzenden Kohlendichtungen mit einer verchromten Oberfläche die beste Lösung darstellte.

Da heute der Abriebverschleiß des Chromüberzuges praktisch vernachlässigt werden kann, so darf man annehmen, daß die Lebensdauer des Läufergehäuses heute nahezu unbegrenzt ist.

Mit Bezug auf das Läufergehäuse ist nun vom Gesichtspunkt der Kosten her das Problem entstanden, wie man es angreifen müsse, um eine möglichst genaue und möglichst dünne

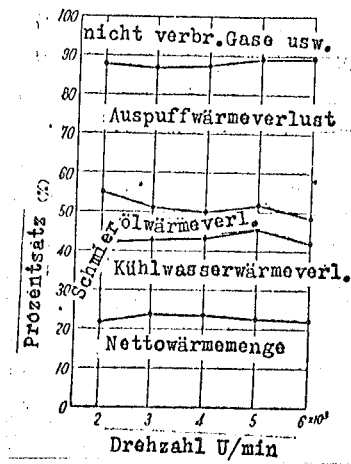


Abb.19 Die Wärmebilanz

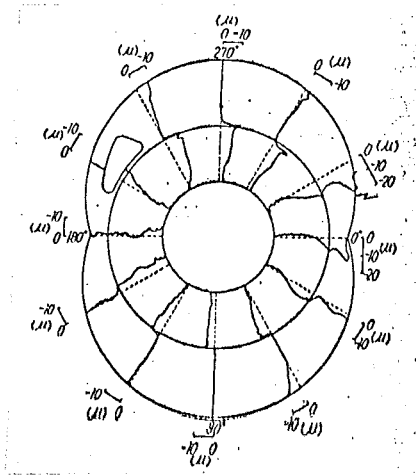


Abb.20 Der Abriebverschleiß des Seitengehäuses nach 100 000 km Fahrt

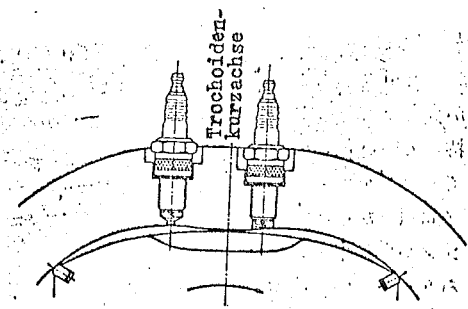


Abb.21 Die Anordnung der Zündkerzen

Chromüberzugsschicht zu erhalten.

Als Dicke eines Chromüberzuges sind einige (5-6) 1/100 mm praktisch möglich, und es besteht durchaus die Aussicht, daß auch bei der Fertigung mit Spezialvorrichtungen mit gutem Arbeitswirkungsgrad der Überzug hergestellt wird, und daß anschließend ein Schleifen nicht mehr notwendig ist.

Als Kohlematerial für die Scheiteldichtungen hat es sich gezeigt, daß das bisher gebräuchliche Kohlematerial bei den zu erwartenden rauen Betriebsbedingungen sowohl hinsichtlich seiner Festigkeit, wie auch im Hinblick auf seinen Abriebverschleiß den Anforderungen nicht gewachsen ist.

Die Kohleforschungsgruppe unserer Firma hat in engster Zusammenarbeit mit einem im Werke des Kohleherstellers zusammengestellten Spezialentwicklungsteam gemeinsame Forschungen durchgeführt, die sich über eine Reihe (5-6) von Jahren erstreckten, und der Erfolg dieser Forschungsarbeiten, sowie eines eigens entwickelten Verfahrens der zerstörungsfreien Prüfung war die Herstellung eines Kohlematerials, welches ausreichend rauen Betriebsbedingungen standhielt.

Bei den heutigen Prüfungen steigt die Drehzahl des Motors bei kurzzeitiger Beschleunigung bis auf 8000-8500 U/Min. an, und bei weiterem Fortschreiten unserer Kohleforschung ist zu hoffen, daß wir die höchstmögliche Drehzahl noch weiter erhöhen können.

## 5.2 Seitendichtungen und Öldichtungen und das Seitengehäuse

Der Abriebverschleiß der Seitendichtungen kann zwar praktisch vernachlässigt werden, bei unserer Firma konnte je-

doch der Abriebverschleiß an den von den Öldichtungen betroffenen Teilen wegen der damit verbundenen Erhöhung des Ölverbrauches nicht vernachlässigt werden.

Wir haben zwar bereits im Abschnitt 3.2 über die Entwicklung einer Öldichtung, welche die Stufe der praktischen Verwendbarkeit erreichte, durch unsere Firma berichtet. Selbstverständlich ist hierbei auch die Lebensdauer mit inbegriffen.

Für das Seitengehäuse ist nicht immer Aluminium als Material erforderlich, im Hinblick auf das geringe Gewicht jedoch und auf die guten Kühleigenschaften hat man bei unserer Firma ein Seitengehäuse aus Aluminium gewählt.

Die abzudichtende Gleitfläche des Aluminiumgehäuses bereitete bereits am Herstellungsort des Aluminiums selbst im Hinblick auf den Abriebverschleiß praktische Schwierigkeiten.

Zur Oberflächenhärtung des Aluminiums gibt es verschiedene Verfahren, bei unserer Firma hat man auf die Gleitfläche der Seitengehäuseoberfläche hochkohlenstoffhaltigen Stahl aufgespritzt (in geschmolzenem Zustand aufgespritzt).

Da jedoch die darauf gleitenden Dichtungen sämtliche aus Metall waren, entstand, obwohl Schmieröl vorhanden war, auf der gehärteten Oberfläche beim Betrieb natürlicherweise ein Abriebverschleiß.

Ganz ähnlich wie bei einem Kolbenmotor, bei welchem der Abriebverschleiß der Zylinderbohrung in der oberen Totpunktlage am größten ist, entstand auch der Abriebverschleiß des Seitengehäuses durch die Seitendichtung in der Nähe der oberen Totpunktlage der Explosion.

Andererseits entsteht der Abriebverschleiß des Seitengehäuses durch die Öldichtung in dem kreisförmigen Teil in der äußeren Arbeitsumfangsbahn (?).

Die Abb.20 zeigt ein Beispiel des praktisch gemessenen Abriebverschleißes des Seitengehäuses nach einer Fahrstrecke von 100 000 km.

Bei diesem Abriebverschleiß kann man sagen, daß nach den Versuchsergebnissen unserer Firma nach wie vor eine ausreichende Widerstandsfähigkeit für die praktische Anwendung gegeben ist. Nach einer Fahrt über eine sehr lange Strecke war je nach dem Grad des Fortschrittes des Abriebverschleißes dieses Seitengehäuses die Leistung abgesunken und der Ölverbrauch war höher geworden, aus diesem Grunde haben wir zum Unterschied vom Läufergehäuse eine Lebensdauer des Motors, welche beim praktischen Gebrauch von der Oberfläche des Seitengehäuses abhängt (?).

Da es sich bei der Oberfläche des Seitengehäuses um eine ebene Fläche handelt, so hat man die Möglichkeit, durch eine einfache ebenflächige spanabhebende Bearbeitung ein abgenütztes Seitengehäuse wieder verwendbar zu machen. Es ist dies ein ganz ähnlicher Vorgang, wie wir ihn in dem Aufbohren der Zylinder eines Motors mit hin- und hergehenden Kolben haben, im Falle des Wankel-Motors jedoch werden keine Teile mit Übermaß (over size) gebraucht.

Die aufgespritzte gehärtete Schicht enthält in ausreichendem Maße diese Wiederbearbeitungszugabe, selbstverständlich ist auch hier die praktische Brauchbarkeit durch Versuche bestätigt worden.

### 5.3 Die Zündkerzen

Da bei den Zündkerzen eines Wankel-Motors die Wärmebelastung wesentlich höher ist als bei den Zweitakt- und Viertaktmotoren, ist hier die Lebensdauer der Zündkerze ein schwieriges Problem.

Wenn es sich nur ganz einfach darum handelte, eine Gegenmaßnahme gegen die hohe Wärmebelastung zu finden, so könnte man dieses Problem dadurch lösen, daß man der Zündkerze einen hohen Wärmewert gibt; wenn man jedoch berücksichtigt, daß bei Kaltstart oder bei langandauerndem Teillastbetrieb die Zündkerzen verschmutzen, dann versteht man, daß dieses Problem nicht einfach nur durch den Wärmewert gelöst werden kann.

Die praktischen Betriebsbedingungen der Zündkerze eines Wankel-Motors sind durch die wechselseitigen Beziehungen einer ganzen Anzahl von verschiedenen Bedingungen bestimmt, nämlich durch die Konstruktion der Zündkerze und ihren Wärmewert, durch die Kühlung des Zündkerzensitzes, durch die Lage der Zündkerze, durch die Größe des Elektrodenraumes, durch die Größe der Verbindungsöffnung zwischen Elektrodenraum und Trochoidenfläche usw.

Unsere Firma hat in Zusammenarbeit mit den Technikern des Zündkerzenherstellers Zündkerzen entwickelt und parallel mit der Entwicklung des Motors selbst untersucht und geprüft. Die Anordnung der Zündkerzen im Motor unserer Firma ist aus der Abb.21 ersichtlich.

Die Lebensdauer der heute in unserem Motor verwendeten Zündkerzen beträgt bei praktischer Fahrt des Wagens 12000-13000 km; wir haben Zündkerzen entwickelt, die auf dem Versuchsstand bei Vollastbetrieb 100 Stunden gut ausgehalten haben.

6. Der Kreiskolbenmotor und der Motor mit hin- und hergehendem Kolben, eine Gegenüberstellung

In unseren vorausgehenden Darlegungen haben wir als wesentliche über unsere Überlegungen bei der Entwicklung unseres Motors und über dessen wichtigste Daten berichtet wobei wir uns vorallem auf die bisher im Hinblick auf eine praktische Anwendbarkeit des Wankel-Motors als problematisch betrachteten Punkte konzentrierten.

Die vorliegende Arbeit ist in einer Form gehalten, welche ganz allgemein den Eindruck erweckt, daß sie sich in der Hauptsache mit der Kritik beschäftigt, welche immer wieder gegen die praktische Brauchbarkeit des Wankel-Motors gerichtet wird und sie ist deshalb vielleicht zu einer erklärenden Darstellung eines mehr negativen Inhaltes geworden, dies schien uns jedoch unumgänglich notwendig zu sein in einer Arbeit, deren wichtigstes Ziel einzig und allein die Betrachtung und die Darstellung des Wankel-Motors als eines praktisch bereits ausgeführten und laufenden Motors war.

Ist es denn nicht so, daß, wenn es sich ganz allgemein um Verbrennungskraftmaschinen handelt, die grundlegenden Probleme, wie etwa die thermischen Formveränderungen, die Schmierung, die Gasdichtung, die Verbrennung usw. und auch der Mechanismus der einzelnen Teile des Motors beim grundsätzlichen Aufbau eines Motors mit hin- und hergehenden Kolben durchweg immer nur Wärmeprobleme sind (?).

Selbstverständlich kommt man, wenn man in diese Probleme tiefer eindringt, auch auf die Größe des Motors, auf seine Form, auf seine Betriebsbedingungen und damit auf die mehr oder weniger großen Unterschiede, die zwischen den

beiden Motorbauarten bestehen; um jedoch bis zu dem heutigen Stand der Entwicklung des Kraftfahrzeugmotors zu gelangen, bedurfte es einer sehr langen Entwicklungsgeschichte, und, so paradox es klingen mag, ist es gerade diese lange Entwicklungsgeschichte, welche uns deutlich zeigt, daß im Grunde genommen in jedem einzelnen Teil des Kraftfahrmotors immer noch schwierige Probleme enthalten sind.

Dazu kommen die vielerlei Betriebsbedingungen, deren Erfüllung von einem modernen Kraftfahrzeugmotor verlangt wird, so insbesondere all die Probleme, welche auf den Motor mit hin- und hergehendem Kolben im Zusammenhang mit den immer höher werdenden Drehzahlen zukommen, und so scheint es uns, daß die Geschichte der ganzen Fülle des technischen Fortschrittes auf diesem Gebiete keineswegs alt ist, sondern viel eher als noch ganz neu bezeichnet werden kann.

Es hat allerdings schon sehr viele Kreiskolbenmotoren gegeben, welche sich alle schließlich als Fehlschläge herausgestellt haben, und die nicht über die bloße Idee hinausgekommen sind. Welches die eigentlichen Gründe hierfür im einzelnen Falle waren, läßt sich schwer sagen; vielleicht waren es die grundlegenden Nachteile, die der einfach veränderte Mechanismus zunächst für eine Verbrennungskraftmaschine als solche haben mußte, oder es waren die Punkte, in denen der Motor mit hin- und hergehendem Kolben von vornherein überlegen war, oder aber es lag daran, daß die sogenannten "Vorzüge" fehlten (?).

Vielleicht war einer der Gründe auch der bei den früheren Entwicklungen den Hintergrund bildenden noch verhältnis-

mäßig niedrige Stand der technischen Entwicklung auf dem Gebiete der Herstellungsverfahren und auf dem Gebiete der zur Verfügung stehenden Werkstoffe.

So gesehen war der Wankel-Motor der erste Kreiskolbenmotor, bei welchem man eine systematische Forschung durchgeführt hat und die Eigenschaften des Kreiskolbenmotors als regelrechte Verbrennungskraftmaschine zu ergründen, eine Forschung, die sich vorallem auf das Kühlsystem, auf die verschiedenen Arten der Schmierung, auf die Form der Verbrennungskammer, auf die zeitliche Einstellung und Abstimmung der Ein- und Auslaßschlitze (port timing), auf die Lage der Zündkerzen, auf die Einflüsse der Herstellungsgenauigkeit usw. bezog; man darf mit Recht behaupten, daß man bis jetzt das Ziel des Kreiskolbenmotors deshalb nicht erreicht hat, weil man eben in der Vergangenheit eine derartige Erforschung des Kreiskolbenmotors überhaupt nicht durchgeführt hat.

Heute kann man jedoch sagen, daß der Wankel-Motor in seinem jetzigen Zustand als praktisch verwendeter Kreiskolbenmotor eine grundlegende Konstruktion von höchstem Potential besitzt.

Wenn einmal das, was man am Wankel-Motor als seine schwachen Punkte bezeichnet, so weit verbessert sein wird, daß diese schwachen Punkte für die praktische Verwendung kein ernstes Problem mehr darstellen, warum sollte dann der Wankel-Motor nicht als Motor für ein Kraftfahrzeug betrieben werden können? Wir wollen uns jetzt einmal überlegen, in welcher Weise wir die sogenannten "Vorzüge" noch verbessern können:

1. Im Verhältnis zu seiner Leistung besitzt der Motor eine sehr kompakte Bauweise; dies gibt eine ganz neue Freizügigkeit bei der Planung des gesamten Fahrzeuges.
2. Bei hohen Drehzahlen besitzt der Motor einen sehr ruhigen Lauf - die hin- und hergehenden Massen und der Verteilmechanismus kommen in Wegfall, was sich hinsichtlich der Schwingungen und der Geräusche vorteilhaft auswirkt; weiterhin ist es die bereits erwähnte günstige prozentuale Drehmomentumwandlung, die sich ebenfalls vorteilhaft auf die Schwingungserregung durch den Antriebskraftübertragungsmechanismus auswirkt.
3. Der Bereich der Betriebsdrehzahlen ist sehr weit, dies bedeutet eine leichte Beeinflussbarkeit des Betriebes durch den Fahrer.
4. Wenn es sich darum handelt, daß die Kosten niedrig sein sollen, insbesondere, wenn eine Erhöhung der Leistung des Motors und eine Steigerung seiner Drehzahl verlangt werden, dann dürfte die an den Kosten gemessene hervorragende Stärke des Wankel-Motors erst recht zur Entfaltung kommen.

Wir sind freilich nicht der Ansicht, daß der Wankel-Motor beim heutigen Stand seiner Entwicklung in allen seinen Punkten schon dem Motor mit hin- und hergehendem Kolben überlegen ist, und wir glauben auch nicht, daß er so, wie er bis heute entwickelt worden ist, für alle möglichen Fahrzeugarten und Betriebsbedingungen geeignet ist.

Warum sollte jedoch nicht auch der Wankel-Motor, genau in der gleichen Weise, wie dies beim Motor mit hin- und hergehendem Kolben schon längst selbstverständlich geworden

ist, seine ganz besonderen Stärken haben?

Zwar dürfte die geeignete Verwendung des Motors jeweils nach wie vor durch die Wahl des Käufers bestimmt werden; als einem der zukünftigen Kraftfahrzeugmotoren jedoch, welche späterhin durch die Motorisierung in Japan und auf der ganzen Welt verlangt werden, dürfte auch dem Wankel-Motor eine Zukunft vorausgesagt werden können, dies ist unsere feste Überzeugung,

Ergänzend wollen wir am Schluß der Arbeit noch bemerken, daß selbstverständlich kein Grund besteht, anzunehmen, daß der Wankel-Motor habe in seinem heutigen Entwicklungszustand bereits den Höhepunkt erreicht. Was uns bei unserer jahrelangen Forschungs- und Entwicklungsarbeit immer mehr deutlich geworden ist, das ist die Tatsache, daß der Wankel-Motor trotz seiner einfachen Konstruktion noch sehr viele Möglichkeiten einer zukünftigen weiteren Entfaltung und Entwicklung in sich trägt, und daß auch die verschiedensten Änderungen in der Konstruktion des Motors selbst durchaus im Bereich der Möglichkeit liegen.

Zum Schluß unseres Berichtes wollen wir nicht versäumen, allen Herren, die uns bei unserer Arbeit durch wertvolle Hinweise oder tatkräftige Mithilfe unterstützt haben, unseren herzlichsten Dank auszusprechen.

#### Literaturhinweise

1. K.Yamamoto: "Die Kreiskolbenmotoren" Zeitschr."Jidosha Gijutsu", Bd.20, Nr.9, 1966.
2. Kurota: "Die neuesten Kreiskolbenmotoren", Zeitschr. "Maschinenforschung", Bd.19, Nr.2, 1967.