

A38

**Bericht Nr. 500**

**Das Ringverfahren**

8595



~~Geheime Reichsangelegenheit~~

## Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 500

### Das Ringverfahren

**Übersicht:** Die Entwicklung des Ringverfahrens liess es ratsam erscheinen, den im August 1939 herausgegebenen Bericht Nr. 394 neu zu bearbeiten und mit einigen Ergänzungen zu versehen.

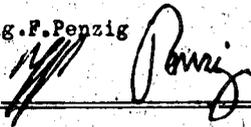
Eine umfassende Darstellung des bisher Erreichten muss auf spätere Zeiten verschoben werden, wobei dann auch die Ergebnisse aller übrigen, jetzt an der Entwicklung beteiligten Stellen berücksichtigt werden sollen. Vorläufig muss das beigefügte Verzeichnis (Anlage 3) aller bisher erschienenen Entwicklungsberichte dazu dienen, um einen Einblick über den jetzigen Stand zu geben. Die Entwicklung hat übrigens dadurch einen gewissen Abschnitt erreicht, dass Anfang Mai 1942 die ersten Probeflüge mit einem nach dem Ringverfahren betriebenen Motor durch BMW Spandau stattfanden.

Im dem Bericht werden zunächst die grundsätzlichen Merkmale der als Ringverfahren bezeichneten Arbeitsweise beschrieben, bei der ein Otto-Gemisch durch eine Dieselerbrennung entzündet wird. Da diese Dieselerzündung bei niederen Verdichtungsverhältnissen durchgeführt werden muss, ist die Entwicklung neuartiger ausserordentlich säundwilliger Stoffe notwendig geworden, deren Eigenschaften beschrieben werden; sie werden als R-Stoff bezeichnet.

Für die mechanische Seite des Arbeitsverfahrens ist die Bemessung und Einspritzung der kleinen R-Stoff-Mengen sowie die Durchbildung der Düsen von Wichtigkeit.

Abgeschlossen am: 1. September 1942 Gr.

Bearbeiter: Obering. F. Penzig



Die vorliegende Ausfertigung enthält

47 Textblätter

4 Bildblätter

### Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1		RLM, GL/A-M II, Fl. Oberstabsing. Mücklich			
2		RLM, GL-CE3, Generaling. Eisenlohr			
3		TH. Berlin, Prof. Dr. Triebnigg			
4		Luftkriegsakademie Gatow Prof. Dr. Holfelder			
5		BMW Spandau, Dr. Stieglitz			
6		Hirth, Stuttgart, Dr. Bentele			
7		Dir. Dr. Müller-Cunradi			
8		Prof. Dr.-Ing. Wilke			
9		Obering. Penzig			
10-12		Techn. Prüfstand			

8596

Ein wesentlicher Vorteil des Ringverfahrens ist der Fortfall der Hochspannungszündung, die den Funkverkehr der Flugzeuge beträchtlich erschweren. Vorteilhaft ist weiterhin der weite Regelbereich, da sehr arme Gemische entzündet werden können. Das Ringverfahren entstand aus dem Bestreben, die meist unvollkommenen Gemische hochsiedender Sicherheitskraftstoffe mit Luft zuverlässig zu zünden. Diese Versuche stellen ein Arbeitsgebiet für sich dar, sodass sie in dieser Zusammenstellung des Ringverfahrens nicht mehr aufgenommen wurden.

Inzwischen hat das seinerzeit noch praktisch nicht angewandte Diesel Gas - Verfahren in grösserem Umfange bei dem Betrieb von Lastkraftwagen mit Dieselmotoren unter Verwendung von Treib- oder Generatorgas Eingang gefunden. Es erschien deshalb zweckmässig, in einem Anhang kurz auf diese als Behelf gedachte Arbeitsweise einzugehen. Die Ursprünge des Ringverfahrens und des Diesel-Gas-Verfahrens führen bis zu Diesel zurück, der in einem Patent die grundsätzlichen Angaben zu diesem Arbeitsverfahren niederlegte. Der Gedanke, mit flüssigen Kraftstoffen betriebene Otto Motoren mit einer Einspritzzündung zu betreiben, wurde 1938 von Herrn Generaling Eisenlohr (RLM) angegeben. Unabhängig hiervon wurde am Techn. Prüfstand die Lösung in der Durchführung eines Dieselverfahrens bei niederen Verdichtungsgraden gefunden. Über die Prioritätsfragen gibt der Anhang Aufschluss.

## Das Ringverfahren

### Einführung

Die heutigen Flugmotoren sind Otto- und Dieselmotoren. Wenn man nach den Unterscheidungsmerkmalen dieser beiden Motoren fragt, so findet man, dass es durchaus nicht einfach ist, eine Antwort zu geben. Das Verdichtungsverhältnis ist nicht charakteristisch, denn es gibt Otto-Motoren mit sehr hohen Verdichtungsgraden und es ist das Bestreben der Dieselmotoren-Entwicklung, mit möglichst niederen Werten auszukommen. Die Gemischbildung findet bei beiden Motoren durch Einspritzen des Kraftstoffes statt und nicht einmal der Zeitpunkt des Einspritzens ist eigentümlich, denn beispielsweise der Hesselman Motor, eine Sonderbauart des Otto-Motors, spritzt den Kraftstoff fast so spät ein wie der Dieselmotor. Auch die Verbrennung eines Dieselmotors ist vorwiegend eine Gleichraum-Verbrennung wie beim Otto-Motor und als entscheidendes Merkmal bleibt lediglich die Art der Zündung bestehen.

So nahe die Verwandtschaft beider Motoren also ist, so bietet doch gerade die Art der Zündung die Möglichkeit, ein neues Arbeitsverfahren zu entwickeln, das die Eigenarten beider Motorenarten miteinander verbindet. Dadurch entstehen aber neue Gesichtspunkte für die Beziehung Kraftstoff und Motor, die, soweit sie bis jetzt bekannt sind, im folgenden beschrieben werden sollen.

Um zu erkennen, worin das neue Arbeitsverfahren von dem jetzt üblichen abweicht, soll zunächst kurz auf das Otto- und auf das Diesel-Verfahren eingegangen und dabei in grossen Umrissen deren Eigenschaften geschildert werden.

## A. Vergleich des Otto und des Diesel-Verfahrens

### 1.) Otto-Verfahren

Die wesentlichsten Merkmale des Otto-Verfahrens, die ihm seit der Zeit seiner Entstehung anhängen, sind die Abhängigkeit von den Zündgrenzen der Kraftstoff-Luftgemische und die Zündquelle in Gestalt eines elektrischen Funkens.

Die Abhängigkeit von den Zündgrenzen führt bekanntlich dazu, dass eine kraftstoffseitige Regelung der vom Motor abgegebenen Leistung in nur sehr begrenztem Masse möglich ist, Bild 1 (906). Mit den üblichen Hilfsmitteln können Gemische nur bis zu einem Luftüberschuss von etwa 30% entzündet werden, wodurch die Leistung ebenfalls um etwa 30% herunterge-regelt werden kann. Im Vollmotor ist es allerdings nicht möglich, die Gemischregelung in diesem Ausmass durchzuführen, da auf Ungleichmässigkeit in der Belieferung der einzelnen Zylinder Rücksicht genommen werden muss.

Man muss also die Gütere-gelung ergänzen durch eine Mengen-regelung, also durch Drosselung, Bild 2 (907). Der Mangel dieses Verfahrens liegt einmal darin, dass im Diagramm eine Verlustfläche auftritt, weiterhin wird das Verhältnis der Restgase zum Frischgas ungünstiger und schliesslich verläuft die Verbrennung unvollkommener, wie der CO-Gehalt der Abgase bei geringen Belastungen beweist. Der Otto-Motor arbeitet also bei Teillast mit schlechtem Wirkungsgrad. Bei Vollast dagegen ist der Wirkungsgrad gut und auch die Leistung ist hoch, da der Zylinderraum vollkommen ausgenutzt werden kann. Die Verweilzeit des Kraftstoffes im Zylinder während Saug- und Verdichtungshub und damit die Güte der Gemischbildung ist nämlich so gross, dass auch Gemische ohne Luftüberschuss noch restlos verbrennen.

Wenden wir uns nun der Zündung zu, so ist zunächst zu bemerken, dass eine punktförmige Zündquelle unvorteilhaft ist, weil sie in ihrer Wirkung von der zufälligen Zusammensetzung des Gemisches in der Nähe der

Funkenstrecke abhängt. Es ist dies bekanntlich daran sehr leicht zu erkennen, dass bei zunehmendem Luftüberschuss die Maschine nicht plötzlich aussetzt, sondern immer noch vereinzelte Zündungen erfolgen, wenn sich in der Nähe des Zündfunken zufällig etwas reicheres Gemisch befindet. Dass mit einer gewissen Ungleichmässigkeit der Gemischbildung beim Otto-Motor stets gerechnet werden muss, Bild 3 (908), zeigt die typische Streuung des Otto Diagramms.

Die Ungleichmässigkeit der Gemischbildung ist besonders gross bei der Verwendung hochsiedender Kraftstoffe, die erst während des Verdichtungshubes in den Zylinder gebracht werden können, um Niederschläge während des Saughubes zu vermeiden (Hesselman). Die infolge der kurzen Zeit nur unvollständige Gemischbildung zwingt beim Hesselman-Motor dazu, Zündkerzen mit weit vorstehenden Elektroden zu verwenden, da erfahrungsgemäss die Gemischbildung an der Wand des Verbrennungsraumes besonders ungünstig ist. Es versteht sich wohl von selbst, dass derartige Zündkerzen für hohe Belastungen ungenügend sind.

Was nun die Betriebssicherheit der elektrischen Zündung betrifft, so leiden die Elektroden bekanntlich sehr unter den Rückständen der Antiklopfmittel. Zündkerzen sind deshalb leider als Verbrauchsgegenstände und nicht als Bauteile anzusehen, die sie wohl sein sollten und als welche man Einspritzdüsen wohl bereits ansprechen kann.

Die Entwicklung besonders hochklopfester Kraftstoffe, die durch das Hydrierverfahren hergestellt werden können, hat zu dem Bestreben geführt, bei Verwendung dieser Kraftstoffe nicht nur höhere Überladungen sondern auch höhere Verdichtungsverhältnisse, z.B. 1 : 8 anzuwenden. Es soll dadurch nicht allein die Leistung sondern auch die Wirtschaftlichkeit erhöht werden. Die hierbei auftretenden höheren Temperaturen und Drücke führen zu einer weiteren Belastung der Zündkerzen, da höhere Spannungen erforderlich werden. Es erhöht dies weiterhin die Schwierig-

ketten, die bereits bei den jetzt üblichen Verdichtungsverhältnissen bei Höhenflug auftreten, wo der Zündstrom geneigt ist, seinen Weg aussen an der Zündkerze zu nehmen, anstatt im Innern des Zylinders an den Elektroden überzuspringen. Nimmt man noch hinzu, dass die gesamte mit Hochspannung arbeitende Zündeinrichtung elektrisch sehr sorgfältig abgeschirmt werden muss, um Störungen des Funkverkehr zu vermeiden, so ist der Wunsch erklärlich, die Zündung schon aus diesem Grund auf anderem Weg zu bewirken.

## II Diesel Verfahren

Betrachtet man nun den Dieselmotor, so ist als wesentlichster Vorteil eine gewisse Unabhängigkeit vom Luftüberschuss festzustellen, denn selbst die kleinste eingespritzte Kraftstoffmenge wird einwandfrei verbrennen, wenn nur die Temperatur der Luft entsprechend hoch ist. Es setzt dies allerdings voraus, dass die Verdichtung lediglich zum Zweck dieser Temperaturerzeugung auf etwa 1:14 bis 1:18 getrieben wird. Der thermische Wirkungsgrad lässt dies zwar noch lohnend erscheinen, da er auch in diesem Bereich noch ansteigt. Bild 4 (895) Praktisch verhält es sich nun allerdings so, dass bei den auftretenden hohen Drücken der mechanische Wirkungsgrad sinkt und so jeder Vorteil aufgehoben wird. Es lässt sich zeigen, Bild 5 (922), dass die Leistung eines Dieselmotors mit abnehmendem Verdichtungsverhältnis nicht etwa sinkt, sondern sogar steigt. Das Bild zeigt, dass ein mit un-mittelbarer Einspritzung arbeitender Dieselmotor bei Gasölbetrieb eine erhebliche Leistungssteigerung erfährt, wenn die Verdichtung von 1:17 auf 1:11 vermindert wird. Die praktische Anwendung dieses Vorteils ist nicht möglich, da der Zündverzug bei diesem niederen Verdichtungsverhältnis so gross wird, dass ein Anlassen nicht mehr möglich ist. Auch ist der Gang des Motors sehr hart. Die Nachteile der hohen Verdichtung sind die Ursache für das Bestreben, Dieselmotoren mit niederen Verdichtungsgraden zu entwickeln. Die auf dem Bild gleichfalls dargestellten Versuche mit anderen Kraftstoffen werden später noch behandelt.

Betrachtet man nun den Zündvorgang selbst, so kann man ihn etwa in folgender Weise schildern: Nach dem Einspritzen des Kraftstoffes in die auf etwa 500-600° erhitze Luft findet, zunächst unter Wärmeverbrauch, ein Aufspalten und Verdampfen des Kraftstoffes statt. Bei dieser Umsetzung, an der der Luft Sauerstoff nur zum Teil beteiligt ist, tritt Kracken und an der Oberfläche des Strahles auch Oxydation ein. Diese Oxydation nimmt im Verlauf der Umsetzung zu und schliesslich tritt sichtbare Verbrennung ein, worauf der Druckanstieg erfolgt, Bild 6 (909). Die Grösse dieses Zündverzuges hängt von der Güte des Kraftstoffes ab, wobei sich bekanntlich die Paraffine durch gute, die Aromaten durch schlechte Zündwilligkeit auszeichnen.

Wie schon erwähnt, ist die Zündung unabhängig vom Kraftstoff-Luft-Verhältnis, da sich stets irgendwo an der Oberfläche des Strahles das zur Entfaltung günstigste Gemisch befindet. Es ist deshalb eine Leistungsregelung vom Leerlauf bis zur Höchstleistung kraftstoffseitig möglich. Der Dieselmotor kann aber nun nicht mit dem stöchiometrischen Verhältnis von Kraftstoff zu Luft betrieben werden, obgleich dies die vollkommene Ausnutzung des Zylinderraumes bedeuten würde. Es ist vielmehr stets ein Luftüberschuss von wenigstens 20% notwendig, da sonst die kurze Zeit des Zündverzugs nicht ausreicht, jedem Kraftstoffteilchen die dazugehörige Sauerstoffmenge zuzuordnen. Der Dieselmotor ist also dem Ottomotor um etwa 20% in der erzielbaren Höchstleistung unterlegen, Bild 7 (910). Umgekehrt ist bei geringen Belastungen der dann mit hohem Luftüberschuss arbeitende Dieselmotor den durch Drosselung geregelten Ottomotor an Wirtschaftlichkeit

## B Das Ringverfahren

### I Allgemeines

Eine Verbindung zwischen den beiden beschriebenen Motorarten ist nun offenbar insofern möglich, als man den Motor nach Art eines Ottomotors ein Gemisch bilden und verdichten lässt, um es dann durch eine

später einsetzende Diesel Verbrennung zu entzünden. Dieses Arbeitsverfahren trägt die Tarnbezeichnung "Ringverfahren" soweit es auf niedrig verdichtende Motoren Anwendung findet; der dabei erforderliche sehr zündwillige Dieselkraftstoff wird als "Ringstoff" bezeichnet<sup>\*)</sup>. Es ist bei diesem Ringverfahren möglich, ähnlich wie beim Dieselmotor, nur mit Gemischregelung auszukommen, da die Diesel Verbrennung genügend Wärme entwickelt, um auch sehr arme Otto Gemische zu entflammen. Es hat dies insbesondere den Vorteil, dass der Wirkungsgrad bei Teillast durch Fortfall der Drosselverluste wesentlich verbessert wird. Es gilt dies allerdings nur für frei ansaugende Motoren. Bei Motoren mit Aufladung würde es selbstverständlich einen nutzlosen Leistungsaufwand bedeuten, wenn der Lader stets voll belastet würde. Hier ist also eine Regelung mit veränderlichem Ladedruck wirtschaftlicher.

Die Gemischbildung nach Otto liefert eine gleichmässige Verteilung des Kraftstoffes in der Luft, sodass kein überschüssiger Sauerstoff wie beim Dieselmotor erforderlich ist. Es ist also die gleiche Leistung wie beim Ottomotor erzielbar. Anstelle der einen oder der beiden Zündfunken treten die zahllosen Zündkerne des Dieselkraftstoffes und anstelle von Zündmagnet und Kerze tritt eine Einspritzpumpe mit Ventilen. Beim Leerlauf arbeitet der Motor ausschliesslich nach dem Dieselverfahren.

Bei der Betrachtung über das Diesel Verfahren wurde gezeigt, dass es zweckmässig ist, mit möglichst niederem Verdichtungsverhältnis zu arbeiten. Nun wissen wir aber vom Dieselmotor her, Bild 8 (880), dass vom Verdichtungsverhältnis der Zündverzögerung sehr stark abhängig ist. Es ist dies besonders im Bereich niederer Verdichtungen der Fall, wo bei gewöhnlichem Gasöl die Zündverzögerungen so stark anwachsen, dass mit ihnen praktisch

\*) Über das entsprechende Verfahren bei hochverdichteten Motoren, z. B. Umstellung von Dieselmotoren auf Treibgasbetrieb siehe Anhang 1. Einen Hinweis auf die Prioritätsfrage bringt Anhang 2.

Viel Spaß bei der Bearbeitung

nicht gearbeitet werden kann. Das Ringverfahren soll nun aber mit möglichst niederen Verdichtungsgraden betrieben werden, einerseits, um hohe Spitzen drücke zu vermeiden, andererseits, weil nicht zu hohe Forderungen an die Klopfestigkeit des Otto Kraftstoffes gestellt werden dürfen. Es wurde deshalb zunächst für die Entwicklung des Ringverfahrens ein Verdichtungs verhältnis von 1:8 gewählt. Dieses Verhältnis kann in jetzt vorhandenen Motoren leicht eingerichtet werden und es war möglich, Stoffe zu finden, die bei den entsprechenden Verdichtungs Endtemperaturen zünden.

Dieses Arbeitsverfahren stellt an die Entwicklung und Forschung ausserordentlich zahlreiche und interessante Aufgaben. So ist es zunächst nötig, einen Diesekraftstoff mit sehr hoher Zündwilligkeit zu schaffen, dessen chemische und physikalischen Eigenschaften erforscht werden müssen. In den äusseren Eigenschaften muss dieser R Stoff alle Bedingungen erfüllen, die auch sonst an Kraftstoffe gestellt werden, wie etwa Korrosion, Stock punkt und Zähigkeit. Motortechnisch ist zu fordern, dass die Entflammung auch bei verhältnismässig niederen Drücken und Temperaturen erfolgt. Die Zündwilligkeit muss auch in ihrer Beeinflussung durch Anwesenheit ver schiedentlicher Otto Kraftstoffe untersucht werden. Von grosser Wichtigkeit sind auch die Fragen der Umsetzungsgeschwindigkeit solcher Stoffe, da hiervon der Druckanstieg, der erreichbare Spitzendruck sowie die Temperaturen ab hängen.

Eingehende Untersuchungen sind darüber notwendig, in welcher Weise der R Stoff in die Otto Ladung eingespritzt werden soll. Strahlform und Strahlort müssen ebenso eingehend geklärt werden, wie die unter ver schiedenen Bedingungen notwendige Menge des R Stoffs, sowie der Zeitpunkt, in dem die Einspritzung erfolgen soll.

Sehr umfangreich sind die Arbeiten, die zur Bewertung des Ring verfahrens im Vergleich zum Otto Verfahren notwendig sind. Diese Vergleiche sind notwendig in Betriebszuständen zwischen Leerlauf bis Vollast und zwischen Betrieb mit freiansaugendem Motor und bei hohen Überladungen, wie

sie heute bei Flugmotoren angewandt werden. Ein ausserordentlich schwieriges Problem ist das Anlassen, da bei Verdichtungsverhältnissen, die wesentlich niedriger sind als bei Dieselmotoren, ein Anlassen möglich sein soll, unter Bedingungen, die viel ungünstiger sind als sie bei üblichen Fahrzeugmotoren gestellt werden. Die Lösung dieser Aufgabe ist also besonders schwierig, da schon beim Fahrzeug Diesel die Frage keineswegs als gelöst gelten kann.

Die Untersuchungen haben sich auch mit den Fragen der Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit sowie damit zu befassen, wie überhaupt die Zündung beim Ringverfahren zustande kommt. Die Klärung dieser Einzelheiten ist für die Beurteilung des Klopfverhaltens von grosser Bedeutung.

Dadurch, dass anstelle einer punktförmigen Zündstelle mehrere, offenbar im ganzen Brennraum verteilte Zündherde vorhanden sind, war das Ringverfahren für die Verarbeitung von hochsiedenden Kraftstoffen besonders geeignet. Sicherheitskraftstoffe, die mit den üblichen Brandgeschossen nicht entzündet werden können, sind viskose und hochsiedende Stoffe. Ihrer Verwendung stellen sich hauptsächlich durch die Verschmierung der Zündkerzen ausserordentliche Schwierigkeiten entgegen. Das Ringverfahren scheint nach den bisherigen Ergebnissen berufen zu sein, die Verwendung von Sicherheitskraftstoffen in Otto Motoren zu ermöglichen.

## II Einzelheiten des Ringverfahrens

### a) Chemische und physikalische Eigenschaften der Ringstoffe.

Das besondere Merkmal des Ringverfahrens ist darin zu sehen, dass bei niederen Verdichtungsgraden eine Verbrennung nach dem Dieselmotorenverfahren durchgeführt wird. Wie auf Bild 4 (895) gezeigt wurde, liegen bei der Verdichtung von 1:8 die Endtemperaturen etwa  $200^{\circ}$  tiefer als bei Verdichtungen, wie sie bei Dieselmotoren üblich sind. Dieselmotoren brauchen nun Kraftstoffe von etwa 40-60 Cetanzahlen und es ist deshalb einleuchtend, dass beim Ringverfahren die Zündwilligkeit weit über 100 CaZ betragen muss, um sichere Zündung zu erreichen.

Die Entwicklung der sehr zündwilligen Ringstoffe stellt eine neue Aufgabe dar, deren Lösung auf zwei Wegen versucht wurde.

- 1.) Entwicklung von Zusatzstoffen, die gewissermassen einen Gegensatz zu den Antiklopfmitteln, wie etwa Bleitetraäthyl darstellen. Diese Klopfpeitschen sollen die Wirkung haben, in kleinen Mengen einem Dieselöl zugesetzt, dessen Zündwilligkeit erheblich zu erhöhen.
- 2.) Entwicklung unvermischter Stoffe, die dank ihres chemischen Aufbaues eine sehr viel höhere Zündwilligkeit haben als die bisher bekannten Dieselöle.

#### 1) Zusatzstoffe, Allgemeines

Macht man sich die Vorstellung zu nutze, die uns die Forschung in letzter Zeit übermittelt hat, so kann man sich die Verbrennung eingespritzten Dieselöles sowie die Wirkung von Zündbeschleunigern folgendermassen vorstellen:

Wird Dieselöl in nochernitzte Luft eingespritzt, so gehen während des Zündverzugs, also in der Zeit zwischen Einspritzen des Kraftstoffes und der Entflammung gewisse Umsetzungen vor sich, deren Geschwindigkeit sich nach Semeroff durch folgende Gleichung ausdrücken lässt:

$$v = A \cdot e^{-k \cdot t}$$

Die Geschwindigkeit  $v$  nimmt also exponentiell mit der Zeit  $t$  zu. Die übrigen Festwerte hängen vom Aufbau des Moleküls, vom Druck und der Temperatur ab.

Auf dem Schema Bild 9 (894) sind als Beispiel zwei Stoffe dargestellt, von denen "A" leicht, "B" schwerer entzündlich ist, also eine längere Aufbereitungszeit benötigt. Die Geschwindigkeit der Umsetzung nimmt zunächst langsam, dann schnell zu, um schliesslich beim Wert  $v_2$  in Entflammung überzugehen. Die entsprechende Zeit ist der Zündverzug. Offensichtlich kann der Zündverzug am wirksamsten dann verkürzt werden, wenn es gelingt, den langsamen Anlauf der Umsetzung zu beschleunigen. Man kann dies durch den

Zusatz von Stoffen sehr grosser Zerfallgeschwindigkeit bewirken. Die Umsetzung wird dadurch zunächst weitgehend durch diesen Zusatz beherrscht. Die Geschwindigkeit nimmt sehr rasch zu und zwar solange, als Zusatz verfügbar ist. Der Endwert der Beschleuniger Umsatzgeschwindigkeit sei mit  $v_x$  bezeichnet. Die Geschwindigkeit folgt weiterhin den Eigenschaften des eigentlichen Kraftstoffes. Da sich die Kurven "A" und "B" im ersten Teil mehr unterscheiden als im letzten, so ist es einleuchtend, dass die Wirkung des Zusatzes auf den schlechteren Kraftstoff "B" stärker ist als auf "A" und dass eine Steigerung des Zusatzes sich bei "B" stärker auswirkt als auf "A". Diese Vorstellung wird durch die Beobachtung bestätigt.

Als zündwillige Grundöle kommen zunächst Stoffe der Paraffinreihe in Frage, die bekanntlich umso zündwilliger sind, je höher das Molekulargewicht ist, womit zugleich auch der Schmelzpunkt steigt. Hierdurch ist die praktische Verwertbarkeit begrenzt. Von den normalen Paraffinen ist Cetan das bekannteste, obgleich es in grösseren Mengen nicht hergestellt wird.

	Cetan	Ceten	RCH Öl
Formel	$C_{16}H_{34}$	$C_{16}H_{32}$	
Spez. Gew bei 20°	0,775	0,783	0,762
Siedepunkt °C	282-297	280-295	200-315
Anilinpunkt °C	94,2	73,2	86,6
Flammpunkt °C	136	129	70
Brennpunkt °C	161	156	102
Heizwert kcal/kg	10 400	10 400	10 400
Zündpunkt (O <sub>2</sub> ) °C	230	238	240
Krist. Beginn °C	+16	2,5	13
Stockpunkt °C			16
Zähigkeit bei 20° St	4,5	4,1	2,5
50° St	2,4		1,4
Cetanzahl	100	87	90

Als Grundöle waren am leichtesten zugänglich die Öle der CO Hydrierung. Die Daten einer Probe sind in der Zahlentafel gleichfalls angegeben.

Als Zündbeschleuniger sind seit langem bekannt:

a) Nitroverbindungen

β) Peroxyde.

Über derartige Zusätze bestehen zahlreiche Patente; das Umfassendste dürfte das englische Patent Nr. 294 129 vom 14. 4. 1927 sein. Es ist dort erwähnt, dass die Verkürzung des Zündverzugs von Dieseltreibstoffen vor teilhaft sei und zwar einmal, um niedere Verdichtungen anwenden zu können, zum anderen, um bei hohen Drehzahlen keine Schwierigkeiten zu haben. Hierfür werden ganz allgemein Zusätze empfohlen, die die Zündtemperatur des Dieselöles herabsetzen. Es werden ausser Nitraten, Nitroverbindungen und Peroxyde auch Verbindungen von Jod, Chlor, Quecksilber und Selen genannt, auch Acetylenverbindungen, wie Acetylenkupfer, sind angeführt.

a) Nitroverbindungen

Die wichtigsten Verbindungen, die als Zündbeschleuniger in der Literatur häufig genannt werden, sind folgende:

Bezeichnung	Formel	spez. Gewicht	Siedepunkt °C	Schmelzpunkt °C	Sauerstoff %
Amylnitrat	$C_5H_{11}ONO$	0,872	99	-	27
Amylnitrat	$C_5H_{11}ONO_2$	0,996	148	-	36
Nitromethan	$CH_3NO_2$	1,13	102	29	53
Tetranitromethan	$C(NO_2)_4$	1,65	126	+13	65
Nitroäthan	$C_2H_5NO_2$	1,05	114	-	43
Nitroäthylen	$CH_2CHNO_2$	1,07	99	-	44
Aethylnitrat	$C_2H_5ONO_2$	1,11	98	-112	53

Die Nitrite und Nitrate sind am leichtesten zugänglich. Amylnitrat ist wegen seines hohen Siedepunktes zu bevorzugen. Versuche hatten gezeigt, dass es ebenso wirksam ist wie Aethylnitrat, woraus hervorgeht, dass auch der Aufbau des Moleküls und nicht nur der Sauerstoffgehalt massgebend ist. Die übrigen Verbindungen werden wohl verschiedentlich als Zusatzstoffe zu Dieselöl und als Kraftstoff für Raketen genannt; ihre Herstellung ist jedoch schwierig.

Die Anwendung der Nitrate und Nitrite scheidet nicht nur wegen ihrer chemischen Unbeständigkeit aus, sondern auch wegen der erheblichen Giftigkeit ihrer Dämpfe.

Es ist weiterhin bekannt, dass man die Zündwilligkeit von aromatischen Stoffen, wie z. B. Kohlenstaub oder Steinkohleteeröl durch Anlagern von  $\text{NO}_2$  steigern kann. Nachteilig ist hierbei, dass in derartig behandelten Ölen sauerstoffhaltige Körper von harziger Beschaffenheit entstehen, die Störungen in den Einspritzdüsen verursachen.

Dieser Mangel tritt nicht auf beim Nitrieren reiner Stoffe. Durch Nitrieren von Ceten konnte so ein brauchbarer Ringstoff erzeugt werden. Die Zündwilligkeit dieses Stoffes entsprache der des Cetans mit einem Zusatz von 6% Amylnitrat.

Wie viele Nitrokörper, so hatte auch dieses Nitrocetan die Eigenschaft, zu korrodieren.

### B) Peroxyde

Über den Aufbau der Peroxyde, die als Zündbeschleuniger bekannt sind, stehen nur wenig Angaben zur Verfügung. Auch die physikalischen Daten sind nur von Stoffen geringer Wirksamkeit bekannt, da die aktiven Vertreter dieser Gruppe wegen ihres sprengstoffartigen Verhaltens schwer zu handhaben sind. Ihre Anwendung zur Verbesserung von Dieselölen ist oft beschrieben worden.<sup>\*)</sup> Irgendwelche praktische Bedeutung haben sie bisher nicht erlangt.

<sup>\*)</sup> z. B. Mohry, Zündbeschleuniger, Diss. T. H. München

*Im Laboratorium des Techn. Prüfstandes*

Ein wesentlicher Nachteil der Peroxyde ist ihre Gefährlichkeit, da sie sprengstoffartigen Charakter haben. Sie haben weiterhin die Eigenschaft unbeständig zu sein und in Mischungen mit Kohlenwasserstoffen Säuren zu bilden, die Metalle stark angreifen. Es wurde auch festgestellt, dass sie ihren Sauerstoff unmittelbar an Metalle abgeben und diese dadurch zerstören. Viele Peroxyde sind feste Körper, die wie das von Brooze vorgeschlagene Aceton-Peroxyd in nur beschränkter Masse in Kohlenwasserstoff löslich sind. Es besteht deshalb stets die Gefahr, dass beim Abkühlen Auscheidungen auftreten, die Explosionen verursachen können.

~~Es wurde nun ein Peroxyd (Methyläthylketonperoxyd) gefunden, das~~ den Vorteil hat, eine Flüssigkeit zu sein, die in Kohlenwasserstoffen unbegrenzt löslich ist. Es besitzt weiterhin den Vorteil langer Lebensdauer und es wurde sogar festgestellt, dass die Zündwilligkeit von RCH-Dieselöl mit dem als Dibutin bezeichneten Zusatz im Lauf von Monaten sogar zunahm. Der Zusatz zu üblichen Dieselölen ist allerdings auch bei diesem "Dibutin" nicht möglich, da hierbei Reaktionen mit den ungesättigten Bestandteilen eintreten.

In reiner Form kann Dibutin nur mit besonderer Vorsicht gehandhabt werden. Mischungen mit Dieselöl in gleichen Teilen sind jedoch völlig ungefährlich. Bei den Versuchen wurde ein Zusatz von 10% als ausreichend gefunden. Ein Stoff, der aus 10% Dibutin in RCH-Dieselöl bestand, wurde als R 110 bezeichnet und fand bei den ersten Versuchen umfangreiche Verwendung. Wie Bild 10 (917) erkennen lässt, wird beim Ringverfahren der Zündverzug durch Verdoppelung des Zusatzes erheblich herabgesetzt. Die Leistung wird jedoch kaum beeinflusst. Der Zusatz verändert die Eigenschaften des Dieselöls also nur in Bezug auf die Cetanzahl, die von 90 auf etwa <sup>155</sup>/~~100~~ heraufgesetzt wird.

*Die Cetanzahl wurde durch den Zusatz von Dibutin auf 155 erhöht. Die Zündverzug wurde durch Verdoppelung des Zusatzes auf 20% herabgesetzt.*

2) Einheitliche R-Stoffe

Die Versuche mit den im vorigen Abschnitt besprochenen Stoffen können als abgeschlossen gelten, seitdem es gelungen ist, Stoffe zu finden, die einheitlich sind und eine wesentliche höhere Zündwilligkeit haben als die Kohlenwasserstoffe der Paraffinreihe.

Im Laufe systematischer Untersuchungen wurde eine grosse Zahl von Stoffen geprüft, ~~unter denen schliesslich einer ausgewählt und mit R 300 bezeichnet wurde.~~ Bei diesen Forschungsarbeiten waren nicht allein die motorischen Eigenschaften, sondern auch die Möglichkeit der Herstellung in grossen Masstabe entscheidend. 7

~~Der neue Stoff hat folgende Eigenschaften:~~

Mischkältemittel	100%	Beinhalt 22%
Spez. Gew.	0,91 kg/ltr	
Siedepunkt	180°C	
Kristallisationsbeginn	-45°C	
Zähigkeit	30°	5,94 cSt
	+20°	1,50 "
	+50°	0,93 "
	+99°	0,56 "
Heizwert		6880 kcal/kg
Luftbedarf		9,3 kg/kg
Dampfdruck	80°	0,02 at
	100°	0,05 "
	150°	0,35 "
Brechung		1,412
Flammpunkt		78°
Cetanzahl		190

Es handelt sich also um einen ziemlich hochsiedenden Stoff, dessen Zähigkeit zwischen dem des Benzins und des Dieselöles liegt. ~~Er kann also mit den üblichen Einspritzgeräten verarbeitet werden.~~ Die Kältebeständigkeit bis -45° bedeutet einen wesentlichen Fortschritt gegenüber dem als R 110 bezeichneten Gemisch aus RCH Dieselöl und 10% Dibutin, bei dem schon bei -12° Paraffinkristalle auftraten. R 300 verhält sich auch in Bezug auf Korrosion einwandfrei ~~mit Aluminium und Eisen.~~

7 R300 die Wahl fiel auf den 12. Stoff - qualit. (C<sub>14</sub>H<sub>30</sub> - C<sub>14</sub>H<sub>28</sub>) (C<sub>14</sub>H<sub>28</sub> - C<sub>14</sub>H<sub>26</sub>) ...

b) Motorisches Verhalten der R-Stoffe

Für die Signung der R-Stoffe ist in erster Linie die Zündwilligkeit massgebend, denn es hängt hiervon das Anlassen des kalten Motors ab und auch der Zündverzug, also die Zeit, in der sich der Ringstoff in unerwünschter Weise mit dem Kraftstoff vermischt.

1) Zündwilligkeit, Kraftstoffempfindlichkeit.

Der I.G.-Prüfdiesel, der für die Messung von Cetanzahlen von 0 - 100 eingerichtet ist, kann auch für die Bestimmung höherer Zündwilligkeiten benutzt werden. Es wird bekanntlich nach dem Zündverzugsverfahren gearbeitet und zwar so, dass der Zündverzug durch Änderung der Verdichtung auf ein festes Mass eingestellt wird. Die Verdichtung ist dann ein Mass der Zündwilligkeit. Anstelle der üblichen Eichkraftstoffe, Methylnaphthalin und Cetan, müssen bei sehr zündwilligen Stoffen andere Vergleichskörper gewählt werden. Als solche diente einerseits eine Mischung aus 80 Teilen Cetan und 20 Teilen Methylnaphthalin, zum anderen ein Gemisch aus RCH-Öl + 30% Dibutin, dem die Cetanzahl 245 zugeordnet war. Um dies festlegen zu können, war die Cetanzahl des reinen Dibutins in verschiedenen Mischungen zu 600 bestimmt worden. Neuerdings wird als obere Grenze ein reiner Stoff benutzt, dem auf ähnliche Weise die Cetanzahl 196 zugeordnet wurde.

Auf diese Weise wurde die Zündwilligkeit des im vorigen Abschnitt beschriebenen R 300 zu etwa 190 ermittelt und damit gleichfalls ein Fortschritt gegenüber dem früher benutzten R 110 erzielt, dem die Cetanzahl 155 zukommt.

Der Vorteil der höheren Zündwilligkeit äussert sich hauptsächlich in leichterem Anlassen der kalten Maschine sowie in der Möglichkeit, bei geringen Temperaturen der Ansaugluft arbeiten zu können. Der Zündverzug wird wohl umso kürzer je höher die Zündwilligkeit ist, jedoch tritt dies nur dann in Erscheinung, wenn der Beginn der Verbrennung und damit der Druckanstieg stets im Totpunkt erfolgt. Bei Einstellung auf beste Leistung muss jedoch so verfahren werden, dass der Höchstdruck etwa  $10^{\circ}$  nach oberem Totpunkt er-

folgt und deshalb ändert sich der Voreinspritzwinkel nicht im Verhältnis zur Cetanzahl. Es stimmt dies mit Erfahrungen am Dieselmotor überein. Bei praktischen Versuchen<sup>\*)</sup> wurde beispielsweise festgestellt, dass der günstigste Voreinspritzwinkel von der Cetanzahl wenig beeinflusst wurde und dass sehr zündwillige Kraftstoffe sogar früher eingespritzt werden mussten, um den Einfluss der trägeren Verbrennung auszugleichen.

Während des Zündverzuges erleidet der eingespritzte R-Stoff durch Vermischen mit dem Otto-Kraftstoff eine Verminderung seiner Zündwilligkeit, sodass der erforderliche Voreinspritzwinkel von der Art des verwendeten Otto-Kraftstoffes abhängt. Tatsächlich steigt auch der Zündverzug, sobald dem Otto-Kraftstoff Bleitetraäthyl beigelegt wird. Die auf Bild 11 (916) dargestellten Ergebnisse sind ziemlich überraschend. Es ergibt sich nämlich, dass bei der Verwendung von Iso-Oktan der Zündverzug grösser als bei Benzol ist, obgleich man aus der höheren Klopfestigkeit des Benzols eigentlich das Umgekehrte erwarten müsste. Wie schon gesagt, ist auch die Wirkung von Bleitetraäthyl deutlich erkennbar. Sie ist jedoch sehr gering und steht in gar keinem Verhältnis zur Steigerung der Klopfestigkeit, die diese Zusätze auf den Otto-Kraftstoff ausüben. Umgekehrt verhalten sich verschiedene R-Stoffe gegenüber ein- und demselben Kraftstoff verschieden. Wurden verschiedene R-Stoffproben mit 25% Flugbenzin B 4 vermischt, so ergab sich folgendes:

	unvermischt	mit 25% B 4 vermischt	CaZ-Verminderung
R 110	147 <sup>++</sup>	116	31
R 200	188	147	41
R 300	184	152	32

Es zeigt sich also, dass sich die beiden Ringstoffe R 110 und R 300 gleich verhalten, während der Versuchsstoff R 200 einen grösseren Verlust an Zündwilligkeit erlitt.

<sup>\*)</sup> Fiebelkorn, Kraftstoff, August 1940

<sup>++)</sup> *infolge hoher Dichte und hoher Viskosität ...*  
*... die Zündwilligkeit ...*

$$\lambda = \frac{P_s}{M} (9.5 - C_p P_s - 0.007 \frac{P_s^2}{A})$$

8613

- 2) Voreinspritzwinkel

Da die Verbrennung des R-Stoffes eine Dieselverbrennung ist, ist es einleuchtend, dass hier weitgehend die von der Dieselmachine her bekannten Gesetzmässigkeiten vorliegen. So wird beispielsweise der Zündverzug grösser mit abnehmendem Verdichtungsverhältnis und sinkender Temperatur der Ladeluft.

Bei diesen Versuchen, die den Zweck hatten, möglichst bald die Grundlagen für die praktische Durchführung des neuen Arbeitsverfahrens am Flugmotor zu schaffen, erfolgte die Einspritzung des R-Stoffes jeweils zu dem Zeitpunkt, der für die Leistung der Maschine am günstigsten war. Es wurde dabei als rein mechanisches Mass der Voreinspritzwinkel, also der Abstand des Einspritzbeginns vom Totpunkt in Kurbelwinkelgraden gemessen. Dieser Winkel ist gewöhnlich grösser als der Zündverzug, der zwischen Einspritzbeginn und Einsatz der Verbrennung gemessen wird, weil, um beste Leistung zu erzielen, die Verbrennung ähnlich wie beim Otto-Motor schon vor dem Totpunkt eingeleitet wurde.

Der Voreinspritzwinkel sinkt mit steigendem Verdichtungsverhältnis, Bild 12 (1001). Auch das Verhalten der Vorzündung beim Otto-Motor lässt auf eine erhöhte Verbrennungsgeschwindigkeit bei höherem Verdichtungsverhältnis schliessen. Bei abnehmendem Verdichtungsverhältnis findet bekanntlich ein Abfallen des Arbeitsdruckes statt, wie die gleichfalls eingetragene Kurve für den Otto-Motor erkennen lässt. Demgegenüber sinkt beim R-Verfahren der Arbeitsdruck stärker ab, da die Verbrennung unvollständig wird. Der Voreinspritzwinkel muss zunächst vergrössert werden und bei sehr niedrigen Verdichtungsgraden wird der Bestwert wiederum bei etwas geringeren Winkeln erreicht. Es hängt dies offenbar damit zusammen, dass bei niedrigen Verdichtungsgraden die Einspritzung nahe am Totpunkt, also nahe der höchsten Verdichtungstemperatur erfolgen muss, wenn überhaupt Zündung eintreten soll. Eine für den praktischen Betrieb sehr wesentliche Frage stellt die Abhängigkeit des Voreinspritzwinkels von der Temperatur der Ladeluft dar, da diese in grossen Höhen erheblich niedriger ist als in Bodennähe. Es zeigt sich nun

Bild 13 (1002). dass bei gleichzeitiger Senkung der Temperaturen von Ladeluft und Kühlstoff der Voreinspritzwinkel sich nur wenig ändert. Es treten schliesslich Aussetzer auf und zwar bei umso niedrigeren Temperaturen je zündwilliger der verwendete R-Stoff ist.

In späteren Abschnitten werden noch verschiedene andere Betriebszustände besprochen, bei denen auch der günstigste Voreinspritzwinkel ermittelt wurde. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich im Bereich der häufigsten Maschinenzustände der Voreinspritzwinkel erfreulicherweise sehr wenig ändert und deshalb mit Ausnahme des Anlassens wahrscheinlich mit einem unveränderlichen Voreinspritzwinkel gearbeitet werden kann.

### 3) R-Stoffmenge und Strahlform

Wie bereits aus Bild 10 (917) hervorging, ist die Menge des R-Stoffs fast ohne Einfluss auf die Leistung des Motors, selbst wenn dieser mit Luftüberschuss arbeitet. Es bedeutet dies, dass der R-Stoff selbst ohne wesentliche Abgabe von Leistung verbrennt. Diese merkwürdige Erscheinung muss noch durch weitere Versuche geklärt werden. Vermindert man die R-Stoffmenge unter ein bestimmtes Mass, so tritt zunächst eine Vergrösserung des Zündverzugs und schliesslich Aussetzen auf. Der Grund liegt nicht nur darin, dass eine Mindestmenge von Energie aufgewandt werden muss, um die zur Zündung erforderliche Temperatur zu erzeugen, sondern auch darin, dass es mechanisch schwierig ist, so kleine Mengen es handelt sich um 5 - 10 mm<sup>3</sup> - regelmässig und in guter Strahlform zu bemessen. Der Zündwilligkeit des R-Stoffs wirkt die Vermischung mit klopfstem Kraftstoff entgegen. Es geht daraus hervor, dass die zum Zünden erforderliche R-Stoffmenge umso kleiner sein kann, je zündwilliger er ist.

Die kleinste Menge R-Stoff, die zur Zündung ausreicht, ist keineswegs die für den Verbrennungsablauf günstigste, da insbesondere bei Teillast eine grössere Menge notwendig ist, um vollkommene Verbrennung zu erzielen. Es spielt hier offensichtlich die von der Menge abhängige Eindringtiefe des Strahles eine Rolle

Das Bild 14 (1054) zeigt, dass bei reichem Kraftstoff-Luftgemisch die kleinste R-Stoffmenge, also die Menge, bei der gerade noch Zündung erfolgt, auch die im Gesamtverbrauch günstigste ist. Die Versuche haben ergeben, dass diese Menge verdoppelt werden kann, ohne dass die Wirtschaftlichkeit leidet. Bei armen Gemischen muss beträchtlich mehr R-Stoff gegeben werden, als zur Zündung notwendig ist. Wird dieses unterlassen, so erfolgt unvollständige Verbrennung. Auch hier ist eine gewisse Spanne für die R-Stoffmenge gegeben, was für die Regelung sehr vorteilhaft ist. Bei sehr armen Gemischen läuft der Ringmotor nahezu als Dieselmotor, sodass die kleinste R-Stoffmenge wiederum auch die für den Verbrauch günstigste ist. Es hat sich ergeben, dass bei sehr geringen Teillasten, etwa 1/10 Last, wie sie allerdings im Flugbetrieb kaum vorkommen, es zweckmässig ist, auf den Kraftstoff zu verzichten und die gesamte erforderliche Leistung nur mit dem R-Stoff aufzubringen.

Der Voreinspritzwinkel ist bei ärmeren Gemischen immer grösser als bei reichen. An sich wäre zu erwarten, dass beim Einspritzen in ein reiches Otto-Gemisch die Zündwilligkeit stärker beeinträchtigt wird, als wenn ein armes Gemisch gegeben ist. Das reiche Gemisch hat jedoch eine so viel kürzere Durchbrennzeitszeit, sodass der geringere Voreinspritzwinkel zustande kommt.

Die Versuche haben gezeigt, dass im allgemeinen eine Menge von 10-20 mm<sup>3</sup> für den bei Flugmotoren häufigsten Belastungsbereich ausreicht und dass erst für sehr geringe Belastung und für das Anlassen grössere Mengen erforderlich werden. Die Einspritzpumpen für den R-Stoff werden also voraussichtlich für zwei Liefermengen einzurichten sein.

Entgegen den Erwartungen genügen die bereits vorhandenen Pumpenbauarten (z. B. Bosch PE 1b - Pumpe mit 6 mm Kolben) den Anforderungen durchaus. Es hat sich noch nicht einmal als notwendig erwiesen, auf besonders kleine Toträume zu achten. Bei diesen Versuchen wurde die beim Otto-Motor typische Schwankung des Verbrennungs-Höchstdruckes statistisch ausgewertet.

*Handwritten notes:*  
bis zur ... (K-L, ...)  
...  
...  
-23-

Die mittlere Abweichung vom Mittelwert wurde als Laufruhe bezeichnet und dadurch ein neuer Bewertungsmaßstab für die Güte der Zündung gewonnen. Es zeigte sich hierbei, dass die Laufruhe des Otto Motors bei Vollast etwas grösser ist als beim Ringverfahren, dass aber bereits bei Reisleistung der Motor beim Ringverfahren wesentlich ruhiger läuft, Bild 15 (929). Bei weiteren Untersuchungen über die Einspritzung des R-Stoffes wird dieser neue Maßstab zweifellos von grossem Nutzen sein.

Der Ring-Motor unterscheidet sich vom Dieselmotor dadurch, dass das zünwillige Öl nicht in reine Luft, sondern in ein Kraftstoff-Luft-Gemisch eingespritzt wird. Es ist einleuchtend, dass das Ideal der Viel-funkenzündung dann erreicht werden würde, wenn es gelänge, den Dieselkraftstoff überall dahin zu bringen, wo sich noch nicht vom Leichtkraftstoff besetzte Sauerstoffmoleküle befinden. Es scheidert dies an der Unmöglichkeit, kleine Ölmengen über den gesamten Verbrennungsraum zu verteilen. Die Lösung dieses Problems wäre gleichbedeutend mit der Erfindung des Höchstleistungs-Dieselmotors.

Es muss vielmehr damit gerechnet werden, dass nur einige Tröpfchen Zündöl den nötigen Sauerstoff finden und der Rest unvollkommen verbrennt. Die Menge des Zündöls muss deshalb möglichst klein sein. Der Strahl muss aber immerhin möglichst tief in das Otto-Gemisch eindringen, um die Wahrscheinlichkeit der Sauerstoff-Zuordnung zu vergrössern.

Die Menge, in der das Zündöl angewandt werden muss, um ein Otto-Gemisch zu entzünden und der Zündverzug, der hierbei auftritt, hängen deshalb auch von der Art der verwendeten Einspritzdüse ab. Auch auf diesem Gebiet sind die Versuche noch im Gange; es hat sich aber immer wieder gezeigt, dass eine feine Zerstäubung nicht vorteilhaft ist. Gute Ergebnisse wurden mit einfachen Lochdüsen erzielt. Für diese Erscheinung kann man zwei Dinge zur Erklärung heranziehen. So findet einmal, wie erwähnt, unvermeidbar eine gewisse Vermischung von Otto- und Dieselkraftstoff statt und zwar wird dies umso mehr der Fall sein, je feiner der Dieselkraftstoff verteilt wird. Im

Gebiet eines geschlossenen Strahles dagegen wird der Anteil des Otto-Kraftstoffes verhältnismässig gering sein. Ein weiterer Grund wird darin liegen, dass feinverteilte Zündöltröpfchen ihre bei der Umsetzung erzeugte Wärme sofort an das Otto-Gemisch abgeben, während bei einem geschlossenen Strahl die Wärme zusammengehalten wird. Beim Anlassen, wo das Einspritzen des R-Stoffs nach Art des Dieselverfahrens in erneute Luft erfolgt, ist eine möglichst feine Verteilung wünschenswert. Diese beiden entgegengesetzten Forderungen zu erfüllen, muss Aufgabe der weiteren Düsenentwicklung sein.

Bei den Versuchen hat es sich als zweckmässig erwiesen, den Strahl in verschiedenen Zeitpunkten seiner Entwicklung genau beobachten zu können. Es wurde deshalb eine Einrichtung geschaffen, bei der der Strahl durch den Funken eines grossen Induktors beleuchtet wurde. Dieses Gerät wurde auf der Seite der Niederspannung durch einen hierfür entworfenen Quecksilber Unterbrecher gesteuert. Durch Drehen des Unterbrecher-Gehäuses konnte der Zeitpunkt des Funken Überschlages auf jeden beliebigen Zeitpunkt der Strahlentwicklung verlegt werden. Die Zeitdauer des Funkens war so kurz, dass auch kleine Tröpfchen unverzerrt im Lichtbild aufgenommen werden konnten. Als Beispiel ist in Bild 16 (1000) der Strahl einer geschlossenen Lochdüse mit 0,3 mm Bohrung und der kegelförmige Strahl einer Zapfendüse für  $60^\circ$  Kegelwinkel dargestellt. Für eingehende Untersuchungen der Eindringtiefe sind Versuche in einer Druckkammer vorgesehen.

Wie schon erwähnt hat sich immer wieder gezeigt, dass die besten Ergebnisse mit Lochdüsen erzielt werden, die einen ziemlich geschlossenen Strahl liefern. So zeigt beispielsweise Bild 17 (995), dass der soeben erwähnte kegelförmige Strahl wesentlich höhere Verbräuche verursacht als der glatte Strahl. Sehr ungünstige Ergebnisse wurden mit einer Düse erzielt, die einen breiten Fächer lieferte, obgleich dieser besonders geeignet erschien, den ganzen Brennraum zu bestreichen. Im allgemeinen kann gesagt werden, dass der Durchmesser der Düsenbohrung keinen sehr wesentlichen Einfluss ausübt. Sie soll etwa 0,3 - 0,4 mm betragen. Bei geschlossenen Düsen

der Bauart Bosch tritt an der eingeläppten Düsenadel stets eine kleine Menge R-Stoff als Lecköl aus, die jedoch im Verhältnis zur geförderten Menge unerheblich ist. Beim Ringverfahren jedoch sind die geförderten Mengen R-Stoff so klein, dass die Leckölmengen schon einen sehr beträchtlichen Anteil der Gesamtförderung darstellt. Bei Mehrzylinder-Motoren ist es deshalb recht schwierig, die Zylinder mit Düsen auszurüsten, die etwa gleiche Leckölvverluste haben. Als R-Stoff-Düsen sind deshalb sogenannte halboffene Düsen zu bevorzugen, bei denen vor der Düsenöffnung sich ein Rückschlagventil befindet und bei denen kein Lecköl entsteht.

Eine besondere Gestalt des Zündstrahles wird durch Anwendung einer Vorkammer erzielt. Bei diesen Versuchen wurde die Düse nicht unmittelbar in die Wandung des Verbrennungsraumes eingesetzt, sondern eine luftgekühlte Kammer von etwa 5 cm<sup>3</sup> Inhalt eingeschaltet. Der R-Stoff entzündete sich in dieser Kammer, sodass die Ladung des Zylinders durch die aus der Vorkammer austretende Stichflamme entzündet wurde. Bei diesen Versuchen ergab sich, dass die Menge des R-Stoffes sehr klein sein konnte. Der Betrieb war durchaus befriedigend. Die weitere Verfolgung dieser Möglichkeit ist erforderlich, da ein mit Vorkammer ausgerüsteter R-Motor mit wesentlich niederen Ladelufttemperaturen arbeiten kann wie ein Motor mit unmittelbarer Einspritzung. Es wurde zu Beginn 1940 angeregt, die drucklose Einspritzung nach Prosper L'Orange auch beim Ringverfahren anzuwenden. Nach den bis jetzt vorliegenden Ergebnissen der Versuche, die von Hirth durchgeführt werden, erscheint dieses Verfahren aussichtsreich, sodass möglicherweise die Einspritzpumpe für den R-Stoff gespart werden kann.

#### c) Leistung und Verbrauch zum Otto-Verfahren

Die höchste erzielbare Leistung ist bei beiden Verfahren dieselbe. Auch im hierzu notwendigen Gemisch im stöchiometrischen Verhältnis, ist durch Ungleichförmigkeit der Gemischbildung stets so viel Sauerstoff verfügbar, dass die Zündung erfolgen kann. Bei reicheren Gemischen ist die Leistung etwas geringer als beim Otto-Verfahren.

In verschiedenen Versuchsreihen wurden die Verbrennungshöchst-  
drücke beim Ringverfahren verglichen mit denen des Otto-Verfahrens. Hier  
bei ergab sich stets jeweils gleiches Verdichtungsverhältnis und Einstel-  
lung auf höchste Leistung vorausgesetzt, geringere Höchstdrücke beim Ring-  
verfahren. Bild 15 (929) enthält das Ergebnis einer älteren Versuchsreihe.  
Bei einer neueren Versuchsreihe wurde der Voreinspritzwinkel bzw. der  
Vorzündwinkel bei unverändertem Kraftstoff-Luftgemisch verschieden einge-  
stellt. Dabei ergab sich, dass die Höchstdrücke beim Ottomotor mit zunehmen-  
der Vorzündung ständig zunehmen, auch wenn die Leistung bereits wieder ab-  
fällt. Beim Ringverfahren dagegen sinkt der Höchstdruck mit der Leistung,  
wenn übermässig zeitig eingespritzt wird.

Bei sehr reichen Gemischen sinkt die Leistung beim Ringverfahren  
stärker als beim Otto Verfahren. Die Ursache ist nicht darin zu suchen, dass  
infolge Sauerstoffmangels Aussetzer auftreten, denn die Streuung der  
Diagramme ist nicht grösser als bei Vollast. (Bild 18 (1091)). Die noch nicht  
abgeschlossenen Untersuchungen befassen sich damit, aufzuklären, warum der  
Druckanstieg erst erheblich nach dem Totpunkt erfolgt und durch Verlegung  
des Einspritzzeitpunktes nicht im günstigsten Sinne beeinflusst werden kann.  
Die Ursache scheint einmal darin zu liegen, dass der in grossen Mengen vor-  
handene Kraftstoff durch seine Verdampfungswärme die Verdichtungs-Endtempera-  
tur drückt, andererseits wird zweifellos auch sehr viel R-Stoff verschluckt  
oder doch in seiner Zündwilligkeit stärker benachteiligt als dies bei ärmeren  
Gemischen der Fall ist. Bei höheren Ladedrücken tritt die Erscheinung in  
weniger ausgeprägtem Masse hervor. Bei sehr hohen Ladedrücken ist sogar ein-  
deutig eine Mehrleistung beim Ringverfahren zu beobachten, Bild 20 (1094).

Im Teillastgebiet ist eine erhebliche Verbesserung des Verbrauchs  
gegenüber dem Otto Verfahren festzustellen. Es hängt dies einerseits damit  
zusammen, dass beim Ringverfahren die Drosselverluste entfallen und dass  
weiterhin der Arbeitsprozess bei hohem Luftüberschuss einen besseren Wirkungs-  
grad hat. Bei frei ansaugender Maschine beträgt, wie Bild 19 (994) zeigt, die  
Verbrauchsverminderung etwa 15% bei Halblast. Diese Verbrauchsverminderung ist am

ausgeprägtesten bei Ladedrücken bis zu etwa 1,4 at, Bild 20 (1094), also in dem Gebiet, das praktisch in Frage kommt. Bei höheren Ladedrücken nimmt die Verbrauchsminderung aus noch zu klärenden Ursachen wieder ab.

Man sollte annehmen, dass diese Überlegenheit auch bei sehr geringen Leistungen vorhanden ist. Tatsächlich ist aber festzustellen, dass etwa bei Viertellast die Verbräuche gleich sind. Diese Belastung wird beim Ringverfahren mit einem Luftüberschuss von etwa 1,6 gefahren und hierbei sinkt die Verbrennungsgeschwindigkeit offenbar erheblich. Es ist dies der Grund dafür, dass die R-Stoffmenge erhöht werden muss. Das Bild 21 (1016) zeigt, dass es wohl möglich ist, mit einer geringen fest eingestellten R-Stoffmenge den gesamten Bereich zu durchfahren, dass dann aber die Verbräuche im Teillastbetrieb ungünstig werden. Die Steigerung der R-Stoffmenge, durch die eine sichere Zündung des sehr armen Gemisches bewirkt wird, hat eine wesentliche Minderung des Verbrauchs zur Folge. Belastungen unter 50% werden im Flugbetrieb kaum angewandt, sie werden nur bei Beginn und Ende des Fluges durchfahren.

Bei sehr geringen Leistungen, also dicht bei Leerlauf, ist auch mit grosser R-Stoffmenge keine restlose Verbrennung des Kraftstoffes möglich. Es ist dann besser, auf den Otto Kraftstoff vollkommen zu verzichten. Dies ist beispielsweise aus Bild 22 (1017) zu ersehen. Bei diesem Versuch wurden Last und Drehzahl gleichzeitig geändert, um das Verhalten eines Flugmotors nachzuahmen. Der Verlauf der Arbeitsdruckkurve ist also willkürlich gewählt. Mit abnehmender Drehzahl und abnehmender Last musste aus den soeben geschilderten Gründen die R-Stoffmenge vergrössert werden und zwar ist hier ein deutlicher Punkt bei  $n = 1200$  feststellbar, bei dem diese Veränderung nötig ist. Unterhalb einer Drehzahl von  $1000 \text{ U/min}$  beträgt der Luftüberschuss etwa 2,5. Hier konnte nun der Verbrauch wesentlich verbessert werden, wenn der nur unvollkommen oder gar nicht verbrennende Otto-Kraftstoff weggelassen wurde. Hierbei war eine entsprechende Vergrösserung der R-Stoffmenge nötig. Gleichzeitig muss der Voreinspritzwinkel erheblich vermindert werden. Da, wie später gezeigt wird, auch das Anlassen ausschliesslich mit R-Stoff er-

folgen muss, ergibt sich für die Regelung die einfache Massnahme, den Kraftstoff unterhalb einer gewissen Menge völlig abzustellen. Die Kraftstoffdüse wird dann allerdings nicht mehr durch den Kraftstoff gekühlt, doch hat sich gezeigt, dass eine Überhitzung der Düse nicht auftritt. Bei diesen Versuchen betragen die Abgastemperaturen unterhalb  $n = 1000$  nur wenig mehr als  $100^{\circ}$ .

d) Überladbarkeit der Kraftstoffe beim Ringverfahren

Die Zündung erfolgt beim R-Verfahren durch den R-Stoff, der in Tröpfchen im ganzen Brennraum verteilt ist. Es ist deshalb zu erwarten, dass die Verbrennung an zahlreichen Stellen zugleich beginnen muss, sodass die Bildung detonierender Gemischreste nicht möglich ist.

Die ersten Versuche schienen dies auch zu bestätigen. Es wurde allerdings bei diesem ersten Versuch die Voreinspritzung so eingestellt, dass der Druckanstieg im o.T. erfolgt. Der vergleichsweise untersuchte Otto-Prozess wurde mit unveränderlicher Zündung  $30^{\circ}$  v. o.T. gefahren. Unter diesen Bedingungen ergab sich beim Otto-Verfahren eine erhöhte Überladefähigkeit. Dies war besonders ausgeprägt bei aromatischen Kraftstoffen. Eine eingehendere Untersuchung unter vergleichbaren Verhältnissen zeigte, dass das Klopfen bei beiden Arbeitsverfahren im gleichen Masse auftritt. Die Ursache muss vorerst darin gesucht werden, dass im Verlaufe des Zündverzugs ein Vermischen des R-Stoffs mit dem Kraftstoff eintritt. Die Folge ist eine Verminderung der Klopfestigkeit, die offenbar gerade den Vorteil der zahlreichen Zündstellen ausgleicht. Es kann sein, dass beim Ringverfahren die Klopferscheinung wesentlich anders abläuft als beim normalen Ottomotor, wo das Klopfen durch plötzliche Zündung eines Restgemisches erfolgt. Da beim Ringverfahren überall im Brennraum Zündkeime vorhanden sind, ist es nicht ausgeschlossen, dass das Klopfen durch die plötzliche Zündung des gesamten Gemisches hervorgerufen wird. Es sind vergleichende Versuche über die Verbrennungsvorgänge beim Diesel-, Otto- und Ringmotor beabsichtigt.

Das Anlassen stellt auch an die Auswahl der R-Stoffdüse besondere Anforderungen. Es hat sich bei allen Versuchen gezeigt, dass für die sichere Zündung des Otto-Gemisches eine gewisse Eindringtiefe erforderlich ist, die nur von einem geschlossenen Strahl erreicht werden kann. Soll die Eindringtiefe mit kleinen Mengen erreicht werden, so ist hierfür eine enge Düsenbohrung Voraussetzung. Beim Anlassen dagegen ist einmal eine grosse Öffnung notwendig, um die verhältnismässig grossen R-Stoffmengen in kurzer Zeit in den Zylinder bringen zu können, zum anderen ist eine feine Zerstäubung erwünscht, um gute Vermischung mit der Luft zu ermöglichen. Die Entwicklung befasst sich deshalb mit der Aufgabe, eine Düse zu beschaffen, die bei kleinen Mengen einen geschlossenen, bei grossen Mengen einen aufgelösten Strahl liefert.

Das Anlassen bei tiefen Temperaturen stellt ein Problem dar, das wegen der geringen Verdichtung noch schwieriger als beim Dieselmotor zu lösen ist. Besonders erschwerend tritt ausser der niedrigen Anlassdrehzahl das grosse Spiel der kalten Kolben sowie die hohe Ventilüberschneidung hervor.

Wie bei vielen Gebieten der Motor-Entwicklung, so hat die Beschäftigung mit dem Ringverfahren auch bei der Entwicklung eines geeigneten Anlassverfahrens zu Wegen geführt, die nicht nur für das Ringverfahren von Interesse sind. Sofern es nicht doch noch gelingt, einen Stoff zu finden, der ausserhalb des Motors sich harmlos verhält, beim Einspritzen in den Zylinder sich jedoch auch bei tiefen Temperaturen sofort entzündet, ist es notwendig, besondere Wärmequellen anzuwenden. Die einfachste Lösung scheint hier die Erwärmung der Ladeluft zu sein.

Unter diesem Gesichtswinkel erhält die Entwicklung von kleinen Verbrennungsmotoren zum Anlassen grosser Flugmotoren eine besondere Bedeutung. Diese kleinen Zweitaktmotoren, wie sie von Hirth entwickelt werden, liefern während des Anlassvorganges Abwärme in der Kühlluft und in Abgasen. Diese Wärmequellen können zum Anwärmen der Ansaugluft des grossen Motors benutzt werden. Da diese Anlassmotoren im Stande sind den grossen Motor

längere Zeit durchzudrehen, besteht die Möglichkeit, die Zylinder mit angewärmter Luft durchzuspülen. Die Entwicklung, die auf diesem Gebiet hauptsächlich in der sorgfältigen Erfassung der Abwärme besteht, hat sich auch für die jetzigen Otto-Motoren als sehr nützlich erwiesen.

Bei der im Mai 1942 von BMW Spandau durchgeführten Flugerprobung wurden die Zylinder mit je einer Zündkerze ausgerüstet, die von einer einfachen Spulenzündung gespeist wurden. Da diese Zündung nur beim Anlassen benötigt wird, entfällt die umständliche und schwere Abschirmung, die sonst zum Schutz des Funkverkehrs erforderlich ist.

### Das Dieselgas Verfahren

Nach Beginn der Versuche mit dem Ringverfahren wurden im Schrifttum Veröffentlichungen bekannt, die sich mit der Umstellung von Dieselmotoren auf Treibgas beschäftigten. All diesen Arbeiten war das Bestreben gemeinsam, einen Ausweg zu finden, falls durch kriegerische Ereignisse die Beschaffung von Dieselkraftstoff erschwert würde.

Man ging hier stets vom Dieselmotor aus, der bei Leerlauf und geringen Belastungen wie bisher als Dieselmotor arbeitete und dem bei höheren Belastungen ein Gemisch von Gas und Luft zugeführt wurde. Es musste hier stets ein Ausgleich in der Form geschaffen werden, dass der Verdichtungsgrad nur so hoch sein dürfte, als die Klopfestigkeit des Otto-Kraftstoffes, also des Gases zuließ. Andererseits aber musste das Verdichtungsverhältnis so hoch sein, dass die Entzündung des eingespritzten Dieselöles, besonders beim Anlassen einer kalten Maschine, sichergestellt war. Trotz gewisser Mängel, die sich hierbei besonders bei der Verwendung von Treibgas herausstellten, bedeutete dieses Verfahren einen Fortschritt gegenüber dem Umbau des Dieselmotors in einen Otto Motor.

Im Gegensatz zu dieser stets nur als Behelf anzusehenden und auch als solche geplanten Umstellung von Dieselmotoren ging die Entwicklung des Ringverfahrens vom Otto Motor aus. Das niedrige Verdichtungsverhältnis derartiger Motoren setzen einen neuen ungemein zündwilligen Dieselkraftstoff, den R Stoff voraus, wenn eine Diesel-Verbrennung durchgeführt werden soll. Die Entwicklung des Ringverfahrens erfolgte nicht allein, weil ein Ersatz der Zündkerzen, besonders beim Betrieb mit Sicherheitskraftstoffen unbedingt nötig war, sondern auch in der Erkenntnis, dass hierdurch eine Betriebsweise des Otto Motors möglich ist, die neue und vorteilhafte Eigenschaften aufweist.

Der Gedanke, im Falle kriegerischer Ereignisse, das Gasöl wenigstens teilweise durch Gas zu ersetzen, war keineswegs auf Deutschland beschränkt. So erschien in der ersten Hälfte des Jahres 1939 eine Reihe von Aufsätzen in der englischen Zeitschrift "Oil Power" und im Juli 1939 ein Bericht über "Eine neue Art von Gasmaschinen" in der Zeitschrift "Gas Times." Bei dieser Maschine handelt es sich um einen Wechselmotor, der einerseits als reiner Dieselmotor, andererseits aber auch als Gasdiesel arbeiten kann. Als Gas scheint hauptsächlich an Stadtgas gedacht zu sein. Die Zündung übernimmt das Dieselöl, während die Leistungsregelung gaseitig erfolgt. Das Erscheinen dieser Aufsätze im Ausland zeigte, wie sehr all diese Fragen an der Oberfläche liegen. Sie wurden damals als eine Mahnung empfunden, das Ringverfahren so schnell wie möglich vorwärts zu treiben, um zum mindesten einen Vorsprung zu gewinnen.

In Deutschland wurde schon sehr frühzeitig vom Reichsverkehrsministerium und vom Waffenamt die Aufgabe gestellt, Dieselmotoren für Lastkraftwagen auch für andere Kraftstoffe geeignet zu machen. Zunächst dachte man an eine Umstellung der Motoren auf reines Otto-Verfahren, wozu Erniedrigung der Verdichtung und Ausrüstung mit Vergaser und Zündungseinrichtung nötig war. Als Kraftstoff war an Treibgas und Generatorgas gedacht. Auch Methyl Alkohol, der im Gegensatz zu Benzin nicht unmittelbar als Ersatz für Dieselöl verwendet werden kann, wurde in Erwägung gezogen. Man nahm damals an, dass im Kriege stillliegende Stickstoffwerke zur Methanol-Herstellung vorhanden sein könnten, eine Voraussetzung, die sich übrigens nicht bewahrheitete. Sämtliche Fragen wurden motortechnisch soweit durchgearbeitet, dass im Oktober 1935 eine Versuchsfahrt mit heimischen Treibstoffen durchgeführt werden konnte. An dieser Fahrt nahm mit gutem Erfolg auch ein 3,3 t Lastwagen der Firma Daimler-Benz teil, dessen Motor aufgrund von Versuchen des Technischen Prüfstandes auf Betrieb mit unvermischem Methanol eingerichtet war.

Der Umstellung von Dieselmotoren auf Otto-Betrieb haftete nun der Nachteil an, dass wertvolle Geräte, wie Vergaser und Zünd-einstellung beschafft und für den Kriegsfall bereit gehalten werden mussten. Der Betrieb von Dieselmotoren mit gasförmigen Kraftstoffen stellte demgegenüber einen Fortschritt dar.

Das Ringverfahren wurde ursprünglich als Otto-Diesel-Verfahren bezeichnet. Es wurde anfangs 1940 von der Wissenschaftlich-Technischen Abteilung des Benzol-Verbandes in Bochum der Bericht Nr. 1022 herausgegeben, der den "Betrieb von Dieselmotoren mit gasförmigen Kraftstoffen nach einem gemischten Otto-Diesel-Verfahren" behandelte. Die dort beschriebenen Versuche wurden 1939 begonnen. Da hierdurch Verwechslungen möglich waren und es ausserdem nicht nützlich erschien, durch den Gebrauch der sehr durchsichtigen Bezeichnungen auf die Beschäftigung der Flugmotoren-Industrie in derartigen Dingen hinzuweisen, wurde eine Tarnbezeichnung vorgeschlagen. Es wurde ein Ausdruck gewählt, der in der Flugmotorenindustrie keine Verwechslungen ergab, andererseits aber auch nicht fremdartig wirkte. Es wurde deshalb die Bezeichnung "Ringverfahren" vorgeschlagen. Gleichzeitig wurden die bisher als Z-Stoffe abgekürzten Zündstoffe als "R-Stoffe" bezeichnet.

Der inzwischen eingetretene Krieg hat eine vielseitige Anwendung des von Diesel angegebenen Dieselgas-Verfahrens gebracht. Da Treibgas in genügender Klopffestigkeit nicht verfügbar war, musste man im Jahre 1941 in verstärktem Masse zur Anwendung von Generatorgas übergehen. Dem Vorteil hoher Klopffestigkeit steht als Nachteil gegenüber, dass umfangreiche Gas-erzeuger-Anlagen mitgeführt werden müssen. Es entsteht hierbei die Frage, ob es günstiger ist, zahlreiche kleine chemische Fabriken auf Fahrzeugen aufzubauen, oder die gleichen Eisenmengen für den Bau von Hydrierwerken zu verwenden. Die Dringlichkeit der Treibstoff-Beschaffung entscheidet in anderer Richtung. Fahrzeuggeneratoren können schneller als Hydrierwerke gebaut werden und sind demnach verstärkt einzuführen.

Im Jahre 1942 wurde die Entwicklung der für aschearme Kohle geeigneten Generatoren vorangetrieben. Gleichzeitig aber hat die Anwendung des Dieselgas Verfahrens seinen Höhepunkt überschritten, da das Gasöl so knapp ist, dass es auch als Zündöl nicht mehr zur Verfügung steht. Es muss wieder daran gedacht werden, Dieselmotoren auf Otto Motoren umzustellen und die Neuerzeugung von Dieselmotoren zum mindesten stark einzuschränken.

An diesen Verhältnissen ist nicht zum wenigsten auch die Fahrzeugindustrie schuld, die im Bestreben den Fahrzeugdieselmotor als besonders vorteilhaft hervortreten zu lassen, jede Preiserhöhung des Dieselöls bekämpfte, die notwendig gewesen wäre als Grundlage zur Erzeugung von Dieselölen mit Hilfe der Hydrierung.

Über das Diesel-Gasverfahren sind zahlreiche Arbeiten erschienen. Mehler veröffentlicht im April 1940 in der Automobiltechnischen Zeitschrift Versuche, bei denen in einem ortsfesten Krupp Motor bei einem Verdichtungsverhältnis von 1:14 ein Betrieb mit Treibgas, Leuchtgas und auch mit Butan durchgeführt wurde. Es ist ohne weiteres klar, dass bei dem hohen Verdichtungsverhältnis mit Butan und auch mit Treibgas kein einwandfreier Betrieb zu erreichen war. Die Unklarheit, die damals in diesen Fragen herrschte, geht daraus hervor, dass man die Ursache in verschiedenen thermischen Wirkungsgraden suchte.

Viele Fragen der praktischen Anwendung waren in der damaligen Zeit noch ungeklärt, sodass man beispielsweise glaubte, dass man auch beim Dieselgas Verfahren bei Teillast drohseln müsse, wie dies beim Otto-Betrieb notwendig ist.

Der Technische Prüfstand hat sich ebenfalls im Jahre 1939 mit der Umstellung der Dieselmotoren auf Treibgas befasst, wobei die grundsätzlichen Erfahrungen des Ringverfahrens sich sehr nützlich erwiesen (ATZ 1940, S. 183). Die Verdichtung wurde bei Vorkammer Motoren auf 1:14 herabgesetzt, da sonst die Klopfestigkeit des Treibgases nicht ausreichte.

Bei den Versuchen wurden folgende Massnahmen bei der Umstellung von Diesel Fahrzeugen für zweckmässig gefunden:

Die Einspritzpumpe wird auf Leerlaufmenge eingestellt. Durch Ziehen an einem Handknopf kann die zum Anlassen erforderliche grössere Menge gegeben und durch Druck die Förderung ganz abgestellt werden, wenn der Motor stillgesetzt werden soll. Das Treibgas wurde in den üblichen Reglern abgespannt und mit einem geringen Überdruck dem Saugrohr zugeführt. Die Regelung erfolgte durch ein kleines Ventil, das von einem Fusshebel aus betätigt wurde. Der Verbrauch von Dieselöl beträgt bei längeren Strecken etwa 15 bis 20% des normalen Verbrauchs als Dieselmotor. Im Stadtbetrieb steigt die Menge auf etwa 30%, sodass auch hier noch erhebliche Mengen von Dieselöl durch Treibgas erzeugt werden können. Der Gesamtverbrauch des Motors war ebenso wie die Leistung etwa die gleiche wie beim Dieselmotor.

Ganz allgemein kann über den Betrieb von Fahrzeugmotoren mit Generatorgas gesagt werden, dass etwa die gleichen Leistungen wie beim Dieselbetrieb erreicht werden. Die Mehrleistung, die der Otto-Motor wegen des geringen Luftüberschusses erreichen müsste, geht verloren, da der Gemischheizwert bei Verwendung von Gas als Kraftstoff kleiner ist. Es wirkt sich dies besonders bei der Verwendung von Generatorgas aus, wobei sich gegenüber der Verwendung von Benzin der Gemischheizwert um etwa ein Drittel vermindert. Bei Treibgas ist der Gemischheizwert verhältnismässig hoch, doch muss mit niederen Verdichtungsverhältnissen gearbeitet werden.

Für die Umstellung eignen sich am besten Motoren mit unmittelbarer Einspritzung, andernfalls müssen Vorkammer-Einsätze entweder vollkommen ausgebaut oder deren Öffnung beträchtlich erweitert werden. Blaskammern werden zweckmässig ausgefüllt, um den lebhaften Gaswechsel auszu-schalten, der eine unzuverlässige Erhitzung bewirken würde.

Verlauf des Verfahrens  
Zur Prioritäts-Frage

Am 27.1.1898 wurde durch das DrP. 109 186 den Firmen Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg und Friedr. Krupp ein Patent mit folgendem Anspruch erteilt:

Zünd- und Verbrennungsverfahren für Verbrennungs-Kraftmaschinen, dadurch gekennzeichnet, dass die Verdichtungstemperatur des arbeitenden Gemisches seine eigene Entzündungstemperatur noch nicht erreicht, jedoch die Entzündungstemperatur eines zweiten, leichter entzündlichen Brennstoffes oder Gemisches erreicht oder überschreitet, sodass eine Einspritzung des letzteren die Verbrennung des Gemisches einleitet, worauf der Verlauf der Verbrennung des Zündbrennstoffes, d. h. von der Steuerung der Maschine bestimmt wird.

Der eigentliche Erfinder ist Rudolf Diesel, der damals Leiter der Versuchsanlage in Augsburg war. Es ist weiter bekannt, dass Diesel bei der Entwicklung seines Motors bereits sehr frühzeitig daran gedacht hat, den Motor mit zwei Kraftstoffen gleichzeitig zu betreiben. Während er ursprünglich wohl daran gedacht hat, das Gas erst kurz vor der Einspritzung des Zündöls in den Zylinder einzublasen, hat er sich doch auch damit befasst, das Gas der Ansaugluft beizumischen.

Da eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Motors durch diesen Dieselmotorbetrieb nicht zu erreichen war, wurde dieser Arbeitsweise in der kommenden Zeit weniger Beachtung geschenkt. 1926 ist von der heutigen Klöckner-Humboldt-Deutz A.G. das Verfahren erneut aufgenommen worden, doch war auch damals noch kein wirtschaftlicher Anreiz gegeben.

Dem Patent von Diesel liegt eindeutig der Gedanke zu Grunde, eine mit Gas betriebene Maschine mit eingespritztem Öl zu zünden. Diese Betriebsweise wird heute bei Fahrzeugmotoren unter Verwendung von Treib- oder Generatorgas vielfach benutzt.

X ZVD S Bd 35 (1941) S. 57, (Lumen, Dieselgasver-  
fahren)

1938 wurde von Herrn General Ing. Eisenlohr (RLM) der Gedanke ohne Kenntnis der Diesel-Patente erneut aufgegriffen und zwar mit der Absicht, ein Gemisch aus Kraftstoff und Luft, wie es in Ottomotoren verwendet wird, durch eine eingespritzte und brennende Flüssigkeit zu entzünden. Die Anregung zu Versuchen hierüber wurde auch der I.G. überbracht. Eine Niederschrift hierüber ist leider nicht vorhanden, womit aber keineswegs die Tatsache in Zweifel gezogen werden soll, dass der Gedanke zuerst beim RLM vorlag.

Unabhängig hiervon wurde der Gedanke bei Arbeiten mit Sicherheitskraftstoffen am Technischen Prüfstand erneut aufgefunden und zur Verwirklichung gebracht.

Bei diesen Versuchen wurde ~~man~~ festgestellt, dass der Zündfunke nicht ausreichte, das Gemisch des Sicherheitskraftstoffes mit Luft zuverlässig zu entzünden und es entstand der Gedanke, hierzu eine Verbrennung nach dem Dieselverfahren heranzuziehen. ~~Da das Verfahren in normalen Otto-Motoren durchgeführt werden sollte, war es notwendig, einen besonders leicht zündenden Dieselkraftstoff zu suchen, der nach längerer Entwicklungsarbeit in dem jetzt in grösserer Masse hergestellten R 300 gefunden wurde.~~

~~In dem Bericht Nr. 372 vom 10. 2. 1939 wurde der damalige Stand der~~ Versuche mit Sicherheitskraftstoffen im Flugmotor behandelt. Es wurden darin auch die grundsätzlichen Einzelheiten des jetzigen Ringverfahrens niedergelegt. Da es nicht zweckmässig erschien, diese Gedanken anderen Stellen zugänglich zu machen, bevor die eigenen Versuche abgeschlossen waren, wurde der Bericht in einer gekürzten Form unter der Bezeichnung 372a herausgegeben.

Der fragliche Abschnitt im Bericht Nr. 372 hat folgenden Wortlaut:

"An dem jetzt vorhandenen Otto-Motor muss die Entwicklung besonders <sup>der</sup> bei Zündung einsetzen. Es ist bekannt, dass ein Zündfunke unzureichend ist, um die Ladung eines Flugmotorenzylinders zu entzünden. Man erzielt deshalb durch Anordnung von zwei Kerzen einen erheblichen Leistungsgewinn. Anzustreben ist die ~~die~~ <sup>die</sup> Vielfunkenzündung. Der aussichtsreichste Weg hierzu ist das

Einspritzen von Stoffen mit niedrigem Selbstzündungspunkt. Es kommen hier in Frage:

Amylnitrat

Peroxyde

Phosphor

Metallalkyle

Die Arbeitsweise des Motors wäre also so, dass, wie bisher, während des Saughubes Benzin in die Luft eingespritzt wird. Kurz vor Verdichtungsende wird dann durch die gleiche, oder durch eine zweite Düse ein Zündkraftstoff eingespritzt. Die Forderungen, die an einen solchen Stoff zu stellen sind, sind folgende:

- 1.) Flammpunkt, der gleich oder höher liegt als der des gleichzeitig verwendeten Kraftstoffes.
- 2.) Entflammung beim Einspritzen in den Kompressionsraum. Druck etwa 10-20 ata, 250-400°C.
- 3.) Geringe Rückstandsbildung, Löslichkeit in Kohlenwasserstoffen, Ungiftigkeit usw.

Der Nutzen eines solchen Stoffes würde sein:

- 1.) Wahrscheinlich ~~erheblicher~~ erheblicher Einfluss auf das Klopfverhalten, da die Bildung von geregelten Druckwellen vermieden wird.
- 2.) Leistungssteigerung
- 3.) Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Beim Fahren mit armem Gemisch wurde bisher sehr bald die Aussetzergrenze erzielt. Aussetzen tritt dann ein, wenn das Gemisch in der Nähe der Zündkerze zufällig in seiner Zusammensetzung unterhalb der Zündgrenze liegt. Eine beim Zerstäuben brennende Flüssigkeit würde auch sehr armes Gemisch zur Entzündung bringen.
- 4.) Sichere Zündung ungleichförmiger Gemische, wie sie z.B. bei hochsiedenden und viskosen Kraftstoffen vorliegen. Um zu vermeiden, dass sich Niederschläge an den Zylinderwänden bilden, muss der Kraftstoff möglichst spät eingespritzt werden. Dadurch aber wird die Zeit für die Gemischbildung kürzer, worunter die Gleichförmigkeit leidet. Es wird deshalb beim Hesselman-Motor mit weit in den Verbrennungsraum vorgeschobenen Elektroden und einem möglichst lange dauernden Zündfunken gearbeitet.

Die Arbeitsweise des Einspritz-Zündmotors kann auch aufgefasst werden als die eines Dieselmotors, der bei niedriger Verdichtung arbeitet, wobei ein sehr zündwilliger Kraftstoff benötigt wird ( $\epsilon = 1:8$  etwa 100 Cetan). Der Motor verdichtet jedoch nicht reine Luft, sondern ein Kraftstoff-Luftgemisch. Versuche sind im Gange.

Dieser Überblick zeigt also, dass der grundsätzliche Gedanke, nämlich die Zündung eines durch die Verdichtungswärme sich nicht entzündenden Gemisches mit Hilfe eines zweiten leicht zündenden Brennstoffes schon von Diesel in sehr klarer Weise gefasst wurde. Dieser Gedanke war keineswegs in Vergessenheit geraten, wie sowohl die Versuche von Deutz im Jahre 1926, wie auch die Anwendung auf Fahrzeugmotoren seit 1939 beweist.

Bereits 1938 entsteht, offenbar ausgehend von der Notwendigkeit, die unzulängliche Zündkerze des Otto-Motors zu ersetzen, der Plan, das verdichtete Gemisch durch eine Einspritzzündung zu entflammen. Ob hierbei an eine Selbstzündung des Zündkraftstoffes nach Art des Dieselverfahrens gedacht war, oder aber an einen Stoff, der beim Zerstäuben schlechthin brannte, ist weniger wichtig als der Gedanke, Kraftstoff-Luftgemische auf diese Weise zu entzünden. Bei den bisherigen Arbeiten war in Anlehnung an Diesel wohl nur an Gas gedacht worden.

~~Den letzten Anstoß erfuhrt die Entwicklung durch die Erkenntnis, dass die Lösung in der Durchführung eines Dieselverfahrens lag, das unter Bedingungen durchgeführt werden musste, wie sie beim Dieselmotor bisher nicht üblich waren. Die Lösung der Aufgabe erfolgte vom Kraftstoff aus durch die Entwicklung eines Dieselkraftstoffes, der sich schon bei der geringen Verdichtungsendtemperatur entzündete, die dem niedrigen Verdichtungsverhältnis des Otto-Motors entsprach.~~ <sup>Nach längerer Entz. wurde im 1938</sup>

*T Diese Dieselverbrennung wurde  
F. Lichte Hoffer von G. Lichte Hoffer, Berlin*

### Geheime Kommandosache!

1. Dies ist ein Staatsgeheimnis im Sinne des § 1 des Gesetzes vom 1. März 1920.
2. Rufe von Hand zu Hand über ein persönliches Auftragsverhältnis in dem Auftrage gegen eine angeordnete Strafe zu halten.
3. Beförderung möglichst durch einen dienstlichen Verkehr.
4. Persönliche Beförderung durch den Empfänger des Auftrages ist nicht zulässig.
5. Bewahrung unter Verantwortung des Empfängers im Falle der Krankheit, eines anderenfalls im Falle der Unmöglichkeit.
6. Verstöße hiergegen ziehen schwere Strafe nach sich.

8595/1