

001066

Deutsche Kraftfahrtforschung
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

Heft 63

Zündverzug und Bewertung des Kraftstoffs

Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen
Prüfverfahrens für Diesel- und Ottokraftstoffe

Dr.-Ing. Hans Ernst VDI

**Zündverzugsmessungen an Diesel-
und Ottokraftstoffen**

Dr.-Ing. Otto Widmaier

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren an der Tech-
nischen Hochschule Stuttgart (Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. W. Kamm VDI)

Bibliothek

der
Ruhrchemie Aktiengesellschaft
Oberhausen - Holten

Eingetragen unter
Nr. 1059

1941

VDI-Verlag GmbH · Berlin NW 7

Die erste Arbeit wurde von der Abteilung Maschineningenieurwesen,
Elektrotechnik und Luftfahrt der Technischen Hochschule Stuttgart
als Dissertation angenommen

D 93

Alle Rechte vorbehalten. Copyright 1941 by VDI-Verlag GmbH, Berlin NW 7
Printed in Germany · Druck: Triasdruck GmbH, Berlin SW 68

DW 908

001067

INHALTSVERZEICHNIS

Zündverzug und Bewertung des Kraftstoffs

Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für Diesel-
und Ottokraftstoffe

Von Dr.-Ing. H. Ernst VDI

1 Stand der Erkenntnisse	1
11 Die Vorgänge bei Selbstzündung	1
12 Die Gesetzmäßigkeiten der Umsetzung	2
2 Versuchsmäßige Bestimmung des Zündvorganges	4
21 Meßverfahren	4
22 Untersuchungen am Lanova-Dieselmotor	4
23 Ermitteln des Zündverzugs	7
3 Größe und Abhängigkeit des Zündverzugs im Motor	8
31 Zündverzugsmeßgerät	8
32 Einfluß der motorischen Betriebsverhältnisse	9
33 Einfluß des Verbrennungsverfahrens	11
34 Einfluß inerte Gase	12
35 Einfluß des Kraftstoffs	12
4 Bewertung des Kraftstoffs	14
41 Allgemeine Gesichtspunkte	14
42 Prüfung der Dieselloststoffe	14
43 Prüfung der Ottokraftstoffe	17
5 Zusammenfassung	18
6 Schriftumsverzeichnis	19

Zündverzugsmessungen an Diesel- und Ottokraftstoffen

Von Dr.-Ing. O. Widmayer

1 Aufgabenstellung	21
2 Das FKFS-Zündverzugs-Prüfverfahren für Kraftstoffe	21
3 Voruntersuchungen über den Einfluß der Verdichtung auf die Cetanzahl von Abblennmischungen	23
4 Ergebnisse mit Dieselloststoffen verschiedener Zusammensetzung	24
5 Zündverzugsmessung an schlecht zündenden Kraftstoffen	24
51 Kühlung der Einspritzanlage	24
52 Zündverzugsmessungen an Benzin-Benzol- und an Iso-Oktan-Heptan- Gemischen	25
53 Zusammenhang zwischen Oktan- und Cetanzahl.	25
54 Einfluß von Zusätzen	27
55 Ergebnisse mit handelsüblichen Ottokraftstoffen verschiedener Zusammen- setzung	29
6 Verbesserung der Prüfeinrichtungen für das FKFS-Verfahren	29
61 Kraftstoffbehälteranordnung	29
62 Meßglaseinrichtung	29
63 Selbstreinigung des Quarzfensters	29
64 Kraftstoffzubringerpumpe	30
7 Genauigkeit des FKFS-Verfahrens	30
8 Zusammenfassung	31
9 Schriftumsverzeichnis	32

Zündverzug und Bewertung des Kraftstoffs

Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für Diesel- und Ottokraftstoffe

Das Verhalten des Kraftstoffs bei der Umsetzung im Dieselmotor wird heute allgemein nach dem Zündverzug bewertet. Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Bewertung hängt sowohl vom verwendeten Meßverfahren als auch von den motorischen Betriebsbedingungen ab. Die genaue Kenntnis dieser Einflüsse ermöglicht die ihnen zukommende Berücksichtigung. Von einem motorischen Bewertungsverfahren ist zu verlangen, daß es einfach ist, in seinem Ergebnis von den Betriebsbedingungen des Motors wenig beeinflusst wird und außer den Diesel- möglichst auch die Ottokraftstoffe erfaßt. Die Untersuchungen des Instituts dienen der Entwicklung eines Zündverzugsmeßverfahrens, das diesen Forderungen entspricht.

1 Stand der Erkenntnisse

11 Die Vorgänge bei Selbstzündung

Die dieselmotorische Umsetzung gliedert sich bekanntlich in die Abschnitte des Zündverzugs, des Druckanstiegs und des weiteren Verbrennungsablaufs. Diesen Abschnitten sind im Regelfall die Gemischbildungsvorgänge — Mikro- und Makrogemischbildung — überlagert, die besondere Bedeutung für den Wirkungsgrad der Umsetzung, die Leistungsausbeute und den Schnellauf haben.

Auch der Zündverzug beeinflusst mit seiner zeitlichen Ausdehnung den Wirkungsgrad und die Schnellaufeigenschaften, ferner die Ganghärte und Triebwerksbeanspruchung. Während des Zündverzugs laufen die zur Zündung führenden Vorgänge ab, die nicht nur aus der physikalischen Aufbereitung bestehen, sondern auch chemischer Art sind. Es zeigt sich z. B., daß in manchen Fällen bereits vor der Entflammung des Kraftstoffs eine Druckerhöhung über den Verdichtungsdruck eintritt. Ferner läßt sich feststellen, daß eingespritzter Kraftstoff, der bei der ersten Verdichtung nicht zur Entzündung gelangt, bereits chemische Veränderungen aufweist oder bei nochmaliger Verdichtung zündet.

Über die inneren Vorgänge bei der chemischen Umsetzung reaktionsfähiger Gemische geben die Forschungen auf dem Gebiet der Gaskinetik Aufschluß [3]¹⁾. Die molekularen Gasbewegungen führen nur für die Moleküle zu einer chemischen Umsetzung, die mit großer Energie geladen sind. Die Wahrscheinlichkeit der Umsetzung des einzelnen Moleküls, aus der sich die gesamte Umsetzungsgeschwindigkeit ergibt, nimmt mit größerer Gemischdichte (höherer Druck) und besonders mit größerer Geschwindigkeit der Moleküle (höhere Temperatur) zu. Die Umsetzung erfolgt durch die Vereinigung der Moleküle; die hierzu notwendige Energie nennt man Aktivierungsenergie. Die Moleküle können dabei durch den eigentlichen Vorgang des Zusammenstoßes aktiviert werden und dann sofort reagieren, oder sie werden durch Aufnahme von Strahlungsenergie usw. aktiviert und reagieren erst, wenn sie zusammenstoßen.

Die schon bei geringen Werten von Druck und Temperatur mit entsprechend kleiner Geschwindigkeit ablaufenden Umsetzungen geben nur geringe Wärmemengen frei, die zunächst an das umgebende Gemisch und an die Brennraumwände abgeleitet werden können. Mit längerer Wärmeentwicklung tritt jedoch eine fortschreitende Selbsterwärmung des Gemisches ein, wodurch die Umsetzungsgeschwindigkeit ihrerseits wieder beschleunigt wird. Die freiwerdende Wärme kann zuletzt nicht mehr schnell genug abgeführt werden, so daß örtlich stark erhitzte Stellen entstehen. An diesen Stellen überschreitet die Umsetzungsgeschwindigkeit dann einen kritischen Wert, was zur Entzündung des Gemisches führt. Von jedem Zündkern breitet sich eine Verbrennungsfront hoher Temperatur, die eine Stärke von Bruchteilen von Millimetern besitzt — infolge Wärmeleitung und -strahlung, Diffusion von Frischgas in verbranntes Gas sowie Diffusion aktiver Teilchen von der

¹⁾ Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Schrifttumverzeichnis auf Seite 19/20.

Brennzone in das Frischgas —, schnell auf das übrige Gemisch aus. Die Umsetzungsgeschwindigkeit nimmt deshalb nach der Entzündung außerordentlich rasch zu.

Dieser Vorgang stellt den Fall der reinen Wärmereaktion dar, deren Bedingungen bereits *van't Hoff* aufgestellt hat. Die Wärme ist sowohl die Ursache als auch die Folge der Umsetzung.

Auf diese Weise läßt sich aber, auch unter Annahme entsprechender Komplikationen, nur eine beschränkte Zahl chemischer Gasumsetzungen erklären. Dies führte zur Annahme von Reaktionsketten, wie sie zum erstenmal *Bodenstein* anführte [2].

Die Bildung einer Reaktionskette erfolgt dadurch, daß das reagierende Molekül nach dem ersten Reaktionsvorgang mit überschüssiger Energie noch hochaktive Zwischenstoffe, z. B. Radikale oder Atome, bildet, die wieder weiter reagieren. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die Reaktionskette durch einen desaktivierenden Vorgang, durch Anstoßen an der Wand oder an einem im Gas enthaltenen festen Körper, durch Mangel an überschüssiger Energie abbricht.

Bilden sich aus einem aktivierten Molekül mehrere neue, die selbst in der gleichen Weise wieder weiter reagieren, so spricht man nach *Semenoff* von verzweigenden Ketten [19].

Bei der reinen Kettenreaktion erhöht sich also die Umsetzungsgeschwindigkeit durch die Bildung der Ketten. Die freigesetzte Wärme ist nur die Folge der Reaktion.

Reine Kettenreaktionen findet man nur in seltenen Fällen. Beispielsweise muß das Auftreten kalter Flammen (250 bis 350° C), die sich bei Temperaturen unter der niedrigsten Zündtemperatur des Gemisches ausbilden, als ein Beweis für den Kettencharakter angesehen werden. Die kalte Flamme kann dabei in die gewöhnliche Verbrennung übergehen. Als weitere Nachweise des Kettencharakters einer Umsetzung werden die hemmende Wirkung der Wände und der hindernde oder fördernde Einfluß von Spuren fremder Körper angesehen [19].

Für praktisch alle im motorischen Betrieb auftretenden Fälle ist die Kettenreaktion auch mit einer Wärmereaktion verbunden. Man muß weiter annehmen, daß alle technischen Verbrennungsvorgänge mit Kettenreaktionen ablaufen [20]. Da die Verlängerung der Ketten gleich gut in gasförmig wie in flüssigem Zustand vor sich geht [19], so ist es unwichtig, ob die Zündung in der gasförmigen oder flüssigen Phase entsteht.

12 Die Gesetzmäßigkeiten der Umsetzung

Während für die physikalische Aufbereitung des Kraftstoffs, die Verdampfungs- und Aufheizvorgänge, zur anteilmäßigen Erfassung brauchbare Unterlagen noch nicht vorliegen, ist es hinsichtlich des chemischen Vorgangs möglich, Gesetzmäßigkeiten aufzustellen.

Alle in Frage kommenden Umsetzungsvorgänge folgen den gleichen kinetischen Gesetzen, die für den einzelnen Umsetzungsverlauf von wenigen Einflußgrößen bestimmt sind. Diese Einflußgrößen sind in ihrer Abhängigkeit von Druck, Temperatur usw. durch den chemischen Mechanismus der Umsetzung bestimmt. Da ihre Berechnung in jedem Fall die genaue Kenntnis des Umsetzungsverlaufs voraussetzt, der heute im allgemeinen noch nicht vorliegt, so müssen sie versuchsmäßig ermittelt werden. Die kinetischen Beziehungen selbst sind damit unabhängig vom Reaktionsmechanismus.

Damit die Moleküle bei einem Zusammenstoß reagieren können, müssen sie eine bestimmte Mindestenergie E aufweisen.

Nach dem Verteilungsgesetz von *Maxwell-Boltzmann* ist die Zahl i' der Moleküle, die von insgesamt i Molekülen den Energiewert E überschreiten:

$$i' = i \cdot e^{-E/RT} \quad (1)$$

Diese in der Zeit- und Raumeinheit aktivierten i' -Moleküle bestimmen die Umsetzungsgeschwindigkeit, die sich nach *van't Hoff-Arrhenius* ergibt zu:

$$w = A \cdot e^{-E/RT} \quad (2)$$

Hierin ist

- A Parameter des Umsetzungsvorgangs,
- E Aktivierungsenergie,
- R Gaskonstante,
- T absolute Temperatur.

Das Gesetz läßt die starke Zunahme der Umsetzungsgeschwindigkeit mit der Temperatur erkennen, so daß im wesentlichen nur die Geschwindigkeit bei tieferen Temperaturen zeitbestimmend sein wird. Die Anwendung auf Zustandsgrößen, die dem motorischen Betrieb entsprechen, ergibt den Zündverzug, wobei jedoch nur der chemische Vorgang erfaßt wird.

Nach *Semenoff* ergibt sich auch bei Kettenreaktionen zwischen der Umsetzungsgeschwindigkeit und der Zeit t der Zusammenhang

$$w = A' \cdot e^{\Phi t} \quad (3)$$

Die Größe Φ enthält hier neben der Temperaturabhängigkeit bzw. der Aktivierungsenergie weitere Einflußgrößen. Für die kritische Geschwindigkeit w_k am Ende des Zündverzugs z gilt

$$w_k = A' \cdot e^{\Phi z}$$

w_k kann als von den Versuchsbedingungen unabhängiger Festwert angesehen werden. Ändert sich A' ebenfalls nur wenig mit der Temperatur, so wird praktisch:

$$\Phi z = \text{konst} \quad (4)$$

Bei einer versuchsmäßigen Untersuchung der Größe Φ als Funktion von Druck (p) und Temperatur (T) fanden *Neumann* und *Egerov* [15]:

$$p^n \cdot e^{-E/RT} \cdot z = \text{konst} \quad (5)$$

also Zündverzug

$$z = \text{konst} \cdot e^{E/RT} / p^n \quad (6)$$

Wolfer [24] bestimmte aus Zündverzugsmessungen die Festwerte dieser Gleichung und gibt als Zündverzug in Dieselmotoren allgemein an:

$$z = \frac{0,44}{p^{1,16}} \cdot e^{1500/T} \quad (6a)$$

(z in $s \cdot 10^{-3}$, p in ata und T in °K).

Diese Gleichung gilt für alle Kraftstoffe mit einer höheren Zündwilligkeit, als einer Cetanzahl C_a von ungefähr 43 entspricht. Beim Berücksichtigen der Zündwilligkeit des Kraftstoffs durch die Cetanzahl C_a gilt nach *Wolfer*

$$z = \text{konst} \cdot e^{E/RT} / C_a p^n \quad (6b)$$

Außer durch Druck und Temperatur wird der Zündverzug weiter durch das Verhältnis von Luft zu Kraftstoff, durch den Einfluß inerte Gase sowie durch die Ausmaße und Eigenschaften der Wände bestimmt. Eine Beziehung, welche diese Einflüsse einzeln erfaßt, wurde von *Prettre* [16] angegeben:

$$\text{Einfluß: } \frac{Q_1^n \cdot Q_2^{n'}}{Q_1} (1 + a) \frac{Q_1}{Q_1} d^2 \cdot e^{-E/RT} \cdot z = \text{konst} \quad (7)$$

Gesamtdruck Kraftstoffkonzentration Anteil inerte Gase Gefäßabmessungen Temperatur.

Hierbei ist:

- Q_1 Menge an Sauerstoff + Kraftstoff je Raumeinheit,
- Q_2 Kraftstoffmenge je Raumeinheit,
- Q_1 inerte Gasmenge je Raumeinheit,
- a Wirksamkeit der inerten Gase (0,5 für N_2),
- $n > 1$, $n' > 1$.

Gl. 7 läßt nur eine qualitative Beurteilung der Einflußgrößen zu, da für eine Berechnung des Zündverzugs ihre Veränderung mit der Zeit berücksichtigt werden müßte.

Für den Fall der einfachen zweimolekularen Umsetzung ohne Kettenbildung hat *F. A. F. Schmidt* [18] den Zündverzug durch Integration der in einem Zeitelement umgesetzten Kraftstoffmenge zwischen Anfangs- und Zündtemperatur errechnet. Für einen gedachten mittleren Reaktionsverlauf ergibt sich

$$z = \frac{e^{E/RT} \sqrt{T}}{p^n} \alpha \beta \quad (8)$$

α stellt den Einfluß des Luftüberschusses dar, β die Verkürzung des Zündverzugs infolge Beschleunigungs der Umsetzung durch Temperaturzunahme. Auch hier müssen die Festwerte versuchsmäßig ermittelt werden. Statt α und β kann auch ein neuer Festwert eingeführt werden.

Da jedoch die Verbrennung im Motor nicht auf die vorausgesetzte einfache Weise abläuft, so ist die Ableitung der Umsetzungsgeschwindigkeit für den allgemeinen Fall nach dieser Gleichung nicht möglich.

Für alle Gleichungen, denen versuchsmäßig ermittelte Werte zugrunde gelegt werden, entspricht naturgemäß der Wert E nicht mehr der Aktivierungsenergie im üblichen Sinne.

Die mit Hilfe der empirischen Gleichungen errechneten Zündverzugswerte stimmen mit den gemessenen Werten im allgemeinen in erster Annäherung überein. Dies berechtigt jedoch nicht zu der Annahme, daß für den Zündverzug ausschließlich die chemischen Vorgänge bestimmend sind. Andererseits liegen noch keine Unterlagen dafür vor, wie sich die physikalischen und chemischen Vorgänge anteilmäßig auf den Gesamtzündverzug verteilen. Da wahrscheinlich sofort nach Einspritzbeginn chemische Vorgänge einsetzen, kann man nicht erwarten, daß der gesamte Zündverzug sich einfach aus der Summe der einzeln ermittelten Verzüge zusammensetzt.

Eine genaue Feststellung des Gesamtzündverzugs, die z. B. für die Kraftstoffbewertung verlangt wird, ist nur am Motor selbst mit Hilfe geeigneter Meßverfahren möglich.

2 Versuchsmäßige Bestimmung des Zündvorganges

2.1 Meßverfahren

Für fortlaufende Aufnahmen am einzelnen Umsetzungsvorgang im Motor kommen folgende Verfahren in Betracht:

1. Messen des Druckverlaufs,
2. Aufnahme der Flammenionisation,
3. Aufnahme der Ausstrahlung des Brennraums,
4. Lichtbildaufnahmen der Verbrennung.

Die Aufnahme des Druckverlaufs im Brennraum stellt das Ergebnis des Zusammenwirkens sämtlicher Vorgänge und damit ein unmittelbares Maß für die Triebwerksbeanspruchung dar; sie ermöglicht auch gewisse Rückschlüsse auf die Einzelvorgänge. Für einen einheitlichen Brennraum ist die Druckanzeige weitgehend unabhängig vom Meßort, sofern das Meßgerät unmittelbar am Brennraum angesetzt werden kann. Man verwendet heute fast ausschließlich Quarzdruckmesser, die mit sehr hoher Eigenfrequenz ausgeführt werden können und damit praktisch verzerrungsfrei und befriedigend zuverlässig arbeiten.

Die Aufnahme des Ionisationsstroms beim Durchgang der Flamme durch eine Meßstrecke ist eine ausgesprochen örtliche Messung. Durch Einführen von blanken Elektroden erhält die Ionisationsstrecke u. U. eine summierende Wirkung in der Weise, daß über der ganzen Länge einer Elektrode der auf die andere übergehende Ionisationsstrom aufgenommen wird [11]. Zum Ermitteln des (kürzesten) Zündverzugs ist es notwendig, die Meßstrecke an den Zündherd heranzubringen, ohne daß der Verbrennungsablauf durch Glühen oder Verkoken der Elektroden gestört wird. Dies bereitet, besonders bei kleinen Hubräumen, Schwierigkeiten.

Die Ausstrahlung des Brennraums wird mit Hilfe von Photozellen aufgenommen, deren Empfindlichkeitsbereich durch die Art der aufgetragenen, strahlungsempfindlichen Schicht (Ca, Cs) gegeben ist. Durch Vorschalten von Filtern ist es möglich, die Strahlung in einem verhältnismäßig engen Bereich der Wellenlänge, z. B. des gelben Lichtes oder der reinen Temperaturstrahlung, aufzunehmen. Die gasgefüllte Zelle ist gegenüber der Vakuumzelle leistungsfähiger, jedoch arbeitet nur die Vakuumzelle frequenzunabhängig. Die gegenseitige Entfernung von Brennraum, Aufnahme-fenster und Photozelle sowie die Größe der freien Querschnitte, insbesondere des Fensterdurchmessers, bestimmen den Aufnahmekegel und damit den Ausschnitt aus dem Brennraum, innerhalb dessen die Strahlung in ihrer Gesamtheit aufgenommen wird. Zur sicheren Aufnahme der ersten Flammenerscheinung ist es notwendig, den Aufnahmekegel gegen den Zündherd zu richten, was im allgemeinen leicht durch entsprechende Formgebung oder Anordnung des Fensters erreicht werden kann. Durch Verkleinern der lichten Querschnitte des Kegels ist es möglich, nahezu punktförmige Messungen durchzuführen. Schwierigkeiten bereitet mitunter die Schwächung der Empfindlichkeit durch Ver-rufen des Aufnahme-fensters. Durch geeignete Ausbildung und Anordnung des Fensters sowie durch Anpassung an die Betriebsverhältnisse kann das Verrufen weitgehend verzögert werden.

Für Lichtbildaufnahmen der Verbrennung gelten im wesentlichen die Bedingungen der Strahlungsmessung im sichtbaren Gebiet. Zur Zündverzugsbestimmung allein genügt die Feststellung der ersten Lichterscheinung durch eine Dauerbelichtung des ablaufenden Films. Einzelheiten der Flammenentwicklung können jedoch nur aus Aufnahmen mit sehr kurzer Belichtungszeit und hoher Bildzahl (Zeitlupe, Funkenaufnahmen) entnommen werden, die aber höheren Aufwand erfordern.

2.2 Untersuchungen am Lanova-Dieselmotor

Zum Klären der Verwendungsmöglichkeit des Strahlungsmeßverfahrens, über das ausreichende Unterlagen nicht vorhanden waren, wurde durch Zündverzugsbestimmungen im weiteren Sinne eine Untersuchung des Verbrennungsablaufs an einem Lanova-Einzyliermotor durchgeführt (Baumuster K 1, Hubraum 1,52 l, Verdichtung $\epsilon = 14,9$, Speicheranteil 13,4 % des Brennraums).

Zur Aufnahme der sichtbaren Strahlung wurde eine gelbempfindliche CsK-Zelle (Preßler GCsKE), für das rote und ultrarote Gebiet eine Sonderzelle (Preßler GSpLE) verwendet. Dieser letzten Zelle wurde nach Bisang [1] ein im sichtbaren Gebiet undurchlässiges Filter (Schott RG 7) vorgeschaltet, so daß nur die ultrarote Strahlung bis ungefähr 1100 Å mit einer ausgeprägten Höchsteempfindlichkeit bei 900 Å aufgenommen wurde. Die Zellen waren an drei verschiedenen Stellen (I, II, III) des Brennraums, wie aus Bild 1 und 2 ersichtlich, gegen die Speichermündung (I), in Richtung der Speicher-längsachse im Speicher (II) und an der Auslaßseite des Brennraums auf die Einspritzdüse (III) zu angesetzt. Die Aufnahme-fenster hatten Quarzeinsätze mit einem lichten Querschnitt, der so groß wie baulich möglich gehalten wurde (6; 10 und 7 mm Dmr.).

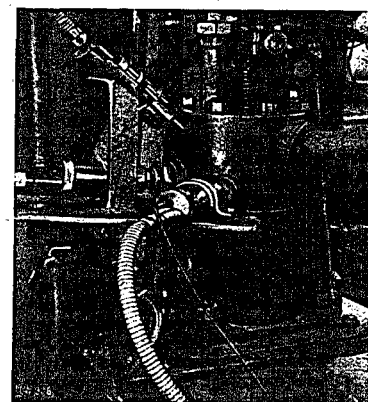


Bild 1. Anordnung der Photozellen zur gleichzeitigen Aufnahme der Ausstrahlung in der Speichermündung (I), im Speicher (II) und im Brennraum (III).

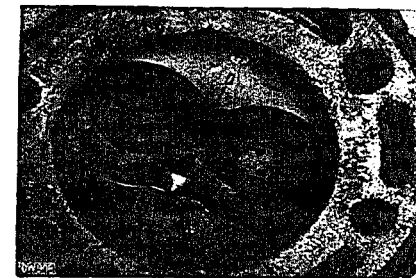


Bild 2. Innenansicht des Zylinderkopfes mit Aufnahmeöffnung für Meßstelle I und III. S Speichermündung; D Einspritzdüse.

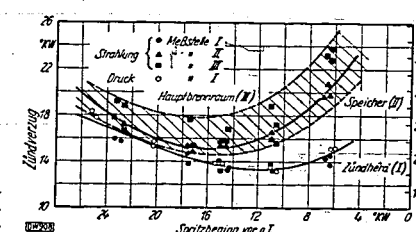


Bild 3. Verbrennungsverlauf an verschiedenen Stellen des Lanova-Dieselmotors. $n = 1200$ U/min; $p_s = 3$ kg/cm².

Im allgemeinen tritt der kleinste Zündverzug und daher die erste Entzündung des Kraftstoffs im Hauptbrennraum in der Gegend der Speichermündung auf (Bild 3); der Kraftstoff trifft hier auf seinem Wege von der dem Speicher gegenüberliegenden Einspritzdüse durch den Brennraum hindurch auf die heiße Mündungszone des Speichers, wo er sich entzündet. Begünstigt durch die Luft- und Kraftstoffstrahlbewegung in Richtung auf den heißen Speicher schlägt die Flamme zunächst in diesen hinein und erst dann greift die Entflammung auf den Hauptbrennraum über.

Die gleiche Feststellung ergibt sich aus Lichtbildaufnahmen des Speichers (Meßstelle II). Hier erscheint im allgemeinen zunächst der Verbindungskanal zwischen Speicher und Brennraum als heller Punkt und erst dann füllt die Flamme auch den Speicher aus. Das gleiche stellte auch Dreyhaupt [8] fest.

Dieser Verbrennungsablauf wird von dem Spritzbeginn wesentlich beeinflusst. Mit frühem Spritzbeginn wird der Zündverzug durch den niedrigeren mittleren Druck- und Temperaturzustand größer. Nach der ersten Zündung greift jedoch die Entflammung sehr rasch um sich, was mit einer entsprechend hohen Drucksteigerung verbunden ist; die Einsatzzpunkte an den verschiedenen Meßstellen liegen dichter beieinander. Dagegen breitet sich die Entflammung mit später Einspritzung und damit bei Zündung nach dem oberen Totpunkt, wenn der (kürzeste) Zündverzug an sich nur unwesentlich zunimmt, deutlich langsamer aus, was auf die zunehmend ungünstigeren Verbrennungsbedingungen zurückzuführen ist.

Die Streuungen sind für die Einsatzzpunkte im Hauptbrennraum am größten, so daß in einzelnen Fällen die Flamme zur gleichen Zeit oder sogar früher als im Speicher erscheint. Man muß daher annehmen, daß die Verbrennung um so unregelmäßiger wird, je mehr sie sich vom Zündherd entfernt. Die Unregelmäßigkeit ist im Gebiet geringer Belastung am größten.

Ferner ist bemerkenswert, daß mit früherer Einspritzung ein zunehmend größerer Anteil des Kraftstoffs im Speicher verbrennt. Umgekehrt erkennt man schon mit bloßem Auge, daß bei spätem Spritzbeginn fast keine Flammenentwicklung im Speicher vorhanden ist, da durch das Aufhören der Strömung in den Speicher in der Gegend des oberen Totpunkts kein Kraftstoff mehr in diesen gelangen kann. Die Druckmessung bestätigt dieses Ergebnis.

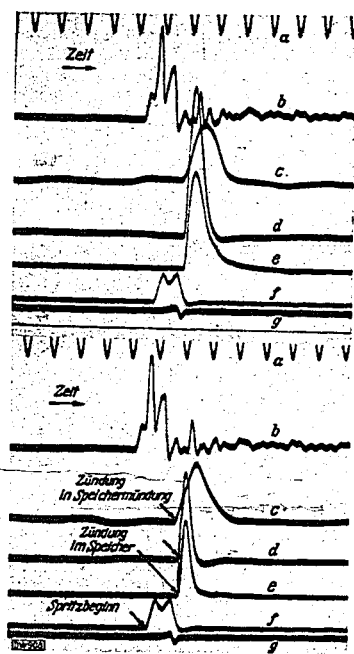


Bild 4 (links). Strahlungsverlauf im Lanova-Luftspeichermotor; zwei Aufnahmen bei gleichen motorischen Betriebsverhältnissen.
a Zeitmarken (500 Hz); b Einspritzdruck; c Wärmestrahlung an der Speichermündung; d Wärmestrahlung im Speicher; e Lichtstrahlung im Speicher; f Bewegung der Düsenadel; g Totpunktmarkierung.

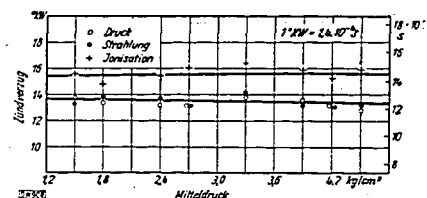


Bild 5. Zündverzögerung, mit verschiedenen Meßverfahren (Druck, Strahlung, Ionisation) ermittelt, in Abhängigkeit von der Belastung (Mitteldruck).
Meßstelle: Speichermündung.
Lanova-Dieselmotor, 1200 U/min.

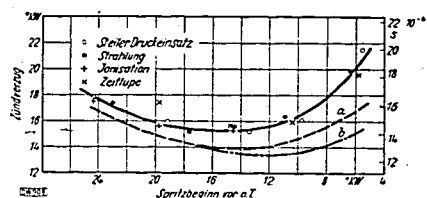


Bild 6. Verbrennungseinsatz (Zündverzögerung) im Speicher bei verschiedenem Spritzbeginn.
Lanova-Dieselmotor, $p_e = 3 \text{ kg/cm}^2$.
Erste schwache Druckzunahme im Speicher (Kurve a), im Brennraum (Kurve b).

Im allgemeinen erfolgt im Brennraum die Entzündung und damit der Strahlungseinsatz nicht so schlagartig wie im Luftspeicher, was auf die wesentlich höheren Temperaturen des Speichers zurückzuführen ist. Hieraus ergibt sich auch zum Teil der wesentlich steilere Druckanstieg im Speicher nach der Zündung. Die Dauer der Verbrennung im Speicher ist dadurch kürzer als die an der Speichermündung oder im Brennraum, so daß man nur von einem kurzen 'Aufblitzen' sprechen kann.

Nach der Zündung steigt die Ausstrahlung zu einem Höchstwert an und sinkt dann wieder ab. Diesem Verlauf können Schwingungen überlagert sein, so besonders bei sehr guten oder schlechten Kraftstoffen und bei sehr frühem oder spätem Spritzbeginn. In seltenen Fällen konnte beobachtet werden, daß die Ausstrahlung an einer Meßstelle nach einer ersten Zündung auf Null zurückging und dann wieder einsetzte. Eine solche örtliche Ungleichmäßigkeit der Ausstrahlung bedeutet jedoch noch nicht eine Ungleichmäßigkeit im gesamten Verbrennungsablauf. So ließ sich bei den vorliegenden

Messungen in keinem Fall feststellen, daß nach einer ersten Zündung die Flamme im gesamten Brennraum vollkommen erlosch und dann wieder einsetzte, was z. B. nach Messungen von Bisang [1] an einem Vorkammernmotor eintrat²⁾.

Die gleichzeitige Aufnahme der Ausstrahlung im sichtbaren und im Wärmestrahlungsgebiet mit Hilfe von Rhodiumspiegeln, welche die Strahlung je zur Hälfte auf beide Zellen lenkten, ergab keinen zeitlichen Unterschied in der Anzeige des Zündungseinsatzes. Man kann daraus schließen, daß für ein Ansprechen der Zelle ausreichende Wärmestrahlungsträger erst bei der wirklichen Entzündung des Kraftstoffs vorhanden sind. Der weitere Verlauf der Licht- und Wärmestrahlung ist grundsätzlich gleich, es sind jedoch deutliche quantitative Unterschiede festzustellen.

Eine weitere quantitative Auswertung der Strahlungsmessungen war für die vorliegenden Untersuchungen nicht vorgesehen. Für die Frage der Ermittlung eines genauen Temperaturverlaufs ergibt sich ungefähr folgender Stand:

Zunächst ist nur ein Vergleich zweier Strahlungsintensitäten möglich, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Strahlung mit zunehmender Temperatur nach einer Exponentialfunktion anwächst. Kennt man die Temperatur an mindestens einer Stelle des Strahlungsverlaufs, was etwa mit Hilfe eines anderen Verfahrens (Umkehr der Natriumlinie) möglich ist, so kann im allgemeinen nach dem Wienschen Gesetz der Verlauf der Gesamttemperatur im Aufnahmekegel errechnet werden. Ist keine Temperaturstelle bekannt, so muß eine Vergleichstemperatur in einer den wirklichen Verhältnissen angepaßten Eichvorrichtung ermittelt werden, was für motorische Verhältnisse schwierig ist. Die Berechnung des Temperaturverlaufs wird einfacher, wenn man durch Vorschalten geeigneter Filter die aufgenommene Strahlung auf möglichst nur eine Wellenlänge einschränkt oder wenn man der Luft einen nur auf einer Wellenlänge ausstrahlenden Körper zusetzt [10].

23 Ermitteln des Zündverzugs

Allgemein läßt sich feststellen, daß aufeinanderfolgende Umsetzungsvorgänge trotz gleicher äußerer Bedingungen erhebliche Ungleichförmigkeiten im Verbrennungsablauf aufweisen können, die von den Betriebsbedingungen und der Art des Verbrennungsverfahrens beeinflusst werden.

Bild 4 zeigt für den Lanova-Luftspeichermotor zwei Aufnahmen der Ausstrahlung des Brennraums bei gleichen motorischen Betriebsverhältnissen (auch gleichem Verlauf des Einspritzdruckes). Sowohl der Höchstwert als auch der Verlauf der Ausstrahlung zeigen deutliche Unterschiede, die im vorliegenden Fall darauf hinweisen, daß auch der Anteil des im Speicher umgesetzten Kraftstoffs von Verbrennung zu Verbrennung verschieden ist. Auch der weitere Verbrennungsablauf im Hauptraum ändert sich. Die größten Schwankungen treten bei späterem Spritzbeginn und bei kleineren Einspritzmengen auf. Der Verlauf des Verbrennungsdruckes ist jedoch wesentlich gleichförmiger, da er das Zusammenwirken sämtlicher Einzelvorgänge darstellt, die sich teilweise wieder ausgleichen.

Die Ungleichförmigkeiten im Verbrennungsablauf werden nicht nur bei stark zerklüfteten Brennräumen wahrgenommen [7], sondern auch beim einheitlichen Brennraum mit unmittelbarer Einspritzung [11]. Wenn auch die Einsatzzpunkte von Druck oder Strahlung beim Zündbeginn im Vergleich zum weiteren Verlauf regelmäßiger liegen — die Ionisationsstrecke ergibt durch die punktförmige Messung größere Streuungen —, so ermittelt man trotzdem Gesetzmäßigkeiten für den Zündverzögerung im motorischen Betrieb zweckmäßig durch Mittelwertbildung.

Berücksichtigt man bei der Bestimmung des Verbrennungseinsatzes das für die Anwendung des Druck-, Strahlungs- und Ionisationsverfahrens Erwähnte, so ergeben sich für sämtliche Verfahren innerhalb der am Motor praktisch möglichen Meßgenauigkeit vollkommen gleiche Zündverzögerungen. Für den Lanova-Dieselmotor zeigt Bild 5 in Abhängigkeit vom mittleren Arbeitsdruck den Zündverzögerung, der am Zündherd (Speichermündung) mit den drei verschiedenen Verfahren ermittelt wurde. Die Ionisationsstrecke gibt hier allerdings um ungefähr 2° KW längere Zündverzögerungen, was darauf zurückzuführen ist, daß die Meßstrecke zurückstand und nicht bis an den Zündherd heranreichte.

Als weiteres Beispiel ist auf Bild 6 der im Speicher (Meßstelle II), also an einer vom Zündherd entfernten Stelle, mit den verschiedenen Meßverfahren ermittelte Zündverzögerung in Abhängigkeit vom Spritzbeginn dargestellt. Die Werte von Bild 5 und 6 sind dabei nur zwei bis vier Einzelaufnahmen entnommen, so daß deshalb die Möglichkeit größerer Streuung vorhanden ist. Außer den bereits erwähnten Verfahren wurden auch Aufnahmen mit der Zeitlupe (Zeiss-Ikon AG.) bei einer sekundlichen Bildzahl von annähernd 6000 durchgeführt. Die Lichtbildwerte reihen sich gut in die mit Ionisations- und Strahlungsmessung festgestellten Werte ein, lediglich bei einem Spritzbeginn von 20° KW vor dem oberen Totpunkt ist eine Abweichung zu bemerken, die wohl auf Unregelmäßigkeiten an den Zusatzgeräten zurückzuführen ist.

²⁾ Bei den Messungen von Bisang war nur eine Meßstelle an der Öffnung für die Glühkerze vorhanden, so daß auch hier das vollkommene Erlöschen der Flamme nicht mit Sicherheit festgestellt werden konnte.

Beim Feststellen der Zündung im Speicher mit Hilfe der Druckanzeige muß berücksichtigt werden, daß unter dem Einfluß der zeitlich früheren Druckentwicklung im Hauptbrennraum sich im Speicher schon eine Abweichung vom reinen Verdichtungsdruck ergibt (Kurve *a* in Bild 6), bevor die Zündung im Speicher eintritt, die durch den Beginn sehr steilen Druckanstiegs gekennzeichnet ist. Durch die Drosselwirkung des Kanals zwischen Speicher und Brennraum wird die erste Druck-erhöhung im Speicher gegenüber der im Brennraum in den Fällen — bei späterem Spritzbeginn — später angezeigt, in denen die erste Zündung tief im Brennraum vor sich geht. Bei Früheinspritzung entsteht die erste Zündung an der Speichermündung; dadurch bilden sich die ersten Druckanzeigen im Speicher und im Brennraum (Kurve *b*) gleichzeitig aus.

Die für die Zündverzugsbestimmung möglichen Meßverfahren geben also im Motorbetrieb praktisch gleich genaue Werte für den Zündbeginn. In keinem Fall traten Unterschiede bis zu 20 % auf, wie sie *Herele* [11] feststellte. Die Gesetzmäßigkeiten der Umsetzung lassen an der Zündstelle überhaupt keine zeitlichen Unterschiede zwischen der mit der Entflammung einsetzenden Ausstrahlung und der Druckerhöhung erwarten. Festgestellte Unterschiede können daher wohl nur auf die Unterschiede der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von Druck und Strahlung, die aber bei der geringen Ausdehnung motorischer Brennräume im allgemeinen ohne Bedeutung sind, oder auf die Unzulänglichkeit der Meßgeräte zurückgeführt werden.

Die Genauigkeit und Gleichförmigkeit der Anzeige ist allgemein am größten, wenn die erste Zündung immer an der gleichen Stelle auftritt; sie wird desto geringer, je mehr sich der Ort der ersten Zündung verändert und je mehr das Meßverfahren sich einer punktförmigen Messung nähert. In dieser Hinsicht ist die Ionisationsstrecke am empfindlichsten, die Druckmessung am unempfindlichsten, da sie nur bei unterteilten Brennräumen die Kenntnis des Zündherdes erfordert. Allerdings ist aus Druckaufnahmen eine genaue Feststellung des Verbrennungseinsatzes bei schleichendem Druckanstieg schwierig, weshalb die Anwendung der Strahlungsaufnahme gewisse Vorteile erwarten läßt.

3 Größe und Abhängigkeit des Zündverzugs im Motor

31 Zündverzugsmeßgerät

Für die Kraftstoffbewertung liegt zur Vermeidung umständlicher Auswertarbeiten beim Bestimmen des Zündverzugs die Aufgabe vor, unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2 angeführten Erkenntnisse ein besonderes Gerät zu entwickeln, das den Zündverzug als Mittelwert in einfacher fortlaufender Anzeige und mit ausreichender Genauigkeit anzeigt. Das Gerät sollte möglichst allgemein verwendbar sein.

Der Zündverzug wird als zeitlicher Abstand zwischen dem Einspritz- und dem Zündbeginn zweckmäßig entsprechend den Verhältnissen am Motor in °KW festgestellt.

Zur Anzeige des Spritzbeginns wird das erste Anheben der Düsenadel verwendet, indem auf deren Verlängerung ein Kontaktstift mit sehr geringer Masse aufgesetzt wird. Beim Berühren mit der Düsenadel wird der Schaltstromkreis geschlossen. Durch ein feines Einstellgewinde kann der Kontaktabstand auf eine kleinste Höhe von $\frac{1}{100}$ mm eingestellt werden.

Für die Anzeige des Zündbeginns kam nach den vorliegenden Bedingungen der Quarzdruckgeber, die Ionisationsstrecke oder die Photozelle in Betracht.

Die Anwendung des Quarzdruckgebers in der Weise, daß der Beginn der durch die Zündung hervorgerufenen Drucksteigerung etwa durch elektrische Differentiation angezeigt wird, was wegen der bereits erwähnten Vorteile sehr erwünscht wäre, zeigte keine befriedigenden Ergebnisse. Die Anzeige ist nur in einem verhältnismäßig engen Bereich in der Gegend des oberen Totpunkts einwandfrei. Hebt sich die Arbeitskennlinie von der Verdichtungskennlinie nur langsam ab, z. B. bei sehr frühem oder spätem Zündbeginn, so ist die Anzeige unzuverlässig.

Mit der Ionisationsstrecke konnte für den Fall der unmittelbaren Einspritzung keine ausreichend gleichmäßige Anzeige erzielt werden, da diese zu stark von den Ungleichförmigkeiten der Zündung abhing.

Die Aufnahme des Strahlungseinsatzes mit der Photozelle ergab gleichmäßige Anzeige bei zweckmäßiger Ausbildung des Aufnahmefensters. Die Entzündungszone wird ohne Schwierigkeit vom Aufnahmekegel erfaßt, so daß der Zündbeginn über den gesamten praktisch in Frage kommenden Bereich einwandfrei angezeigt wird.

Der zeitliche Abstand der von Düsenkontakt und Photozelle kommenden Steuerimpulse entspricht dem Zündverzug. Er wird nach *Staiger*³⁾ dadurch ermittelt, daß durch den Kontaktschluß an der Düse die Gittervorspannung einer zunächst gesperrten Röhre verändert wird und damit in ihrem

³⁾ K. Staiger: Beschreibung zum Zündverzugsmeßgerät Bauweise FKFS — Dtsch. Kraftf.-Forsch. Zwischenbericht 45, Berlin: Reichsverkehrsministerium 1939.

Anodenkreis, in dem auch das Zeigergerät liegt, ein Strom fließt. Durch eine Speichereinrichtung wird dieser Strom solange in gleicher Höhe gehalten, bis die Röhre bei der Zündung von der Photozelle über einen zweistufigen Verstärker einen negativen Stromstoß erhält, der die Röhre wieder sperrt. Der Anodenstrom wird dadurch wieder Null. Als Zeigergerät wird ein Drehspulgerät von genügender Trägheit verwendet, das die mittlere Stromstärke anzeigt. Diese ist dem Zündverzug proportional. Die äußere Ansicht des Gerätes und der Steuerteile, Photozelle und Düsenkontakt, geben Bild 7 und 8 wieder.

Der notwendige Kontaktabstand an der Düse (ungefähr $\frac{1}{100}$ mm) verkleinert zunächst den Zündverzug um den Bruchteil eines Kurbelgrades. Da aber zur Auslösung der Steuerung der Photozelle

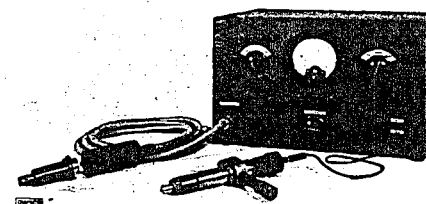


Bild 7. FKFS-Zündverzugsmeßgerät.

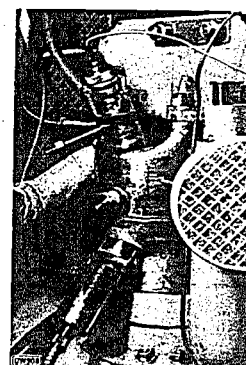


Bild 8. Photozelle (a) und Kontakt (b) am FKFS-Prüfmotor angebaut.

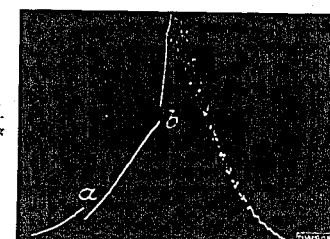
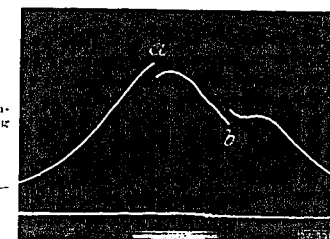


Bild 9. Zündverzug, durch Kontakt und Photozelle gesteuert, und dem Druckverlauf überlagert (vgl. Text).
a Spritzbeginn;
b Zündung.

eine bestimmte Mindestintensität der auffallenden Strahlung notwendig ist, so erfolgt auch der Steuerimpuls der Zelle um die zum Erreichen dieses Schwellwertes notwendige Zeit später. Da diese Zeit von der gleichen Größenordnung ist wie die Verzögerung am Kontakt, tritt ein gewisser Ausgleich des Fehlers in der Kontaktanzeige ein. Die Ablesungenauigkeit des Anzeigeorgans beträgt $\frac{1}{10}$ °KW. Die Ungenauigkeit der Messung des Zündverzugs kann bei Ungleichförmigkeiten im Spritz- und Zündbeginn größer sein.

Die grundsätzliche Wirkungsweise dieser Zündverzugsbestimmung ist aus Bild 9 ersichtlich. Hier wurden die von Düsenkontakt und Photozelle kommenden Steuerimpulse dazu benutzt, den Druckverlauf während des Zündverzugs in der Höhe um ein gleichbleibendes Stück zu versetzen. Diese Schaltung diente zum Nachprüfen des Anzeigeorgans.

32 Einfluß der motorischen Betriebsverhältnisse

Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Kraftstoffbewertung hängt zunächst von der eingehenden Kenntnis des Einflusses ab, den die einzelnen Betriebsgrößen auf den Zündverzug ausüben.

Die motorischen Betriebsbedingungen beeinflussen den Zündverzug in dem Maße, wie sie Temperatur und Druck der Verbrennungsluft zwischen Spritzbeginn und Zündung bestimmen. Demnach

wird der Zündverzug im wesentlichen durch die Höhe der Verdichtung und den Zeitpunkt des Spritzbeginns beeinflusst. Weiterhin haben, abgesehen vom Verbrennungsverfahren, auch die Drehzahl, die Temperatur der Ansaugluft und des Kühlmittels auf den Zustand der Verbrennungsluft und damit auf den Zündverzug unmittelbaren Einfluß.

Ein Erhöhen der Verdichtung hat durch Steigern von Temperatur und Druck während des Verdichtungsstages eine Verkürzung des Zündverzugs zur Folge (Bild 10 a). Die Gesetzmäßigkeiten der adiabatischen Verdichtung ergeben mit höherer Verdichtung eine immer geringere Abnahme des Zündverzugs, der infolgedessen einem Grenzwert zustrebt.

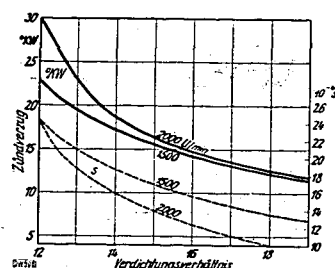


Bild 10 a. Einfluß des Verdichtungsverhältnisses. Voreinspritzwinkel = 20°.

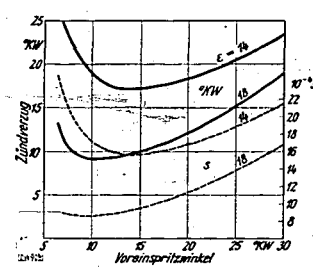


Bild 10 b. Einfluß des Voreinspritzwinkels. $n = 1800$ U/min.

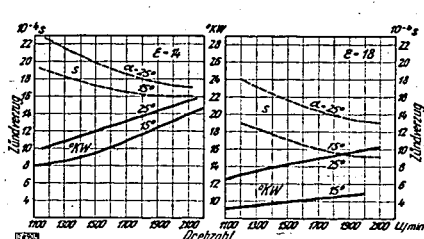


Bild 10 c. Einfluß der Drehzahl.

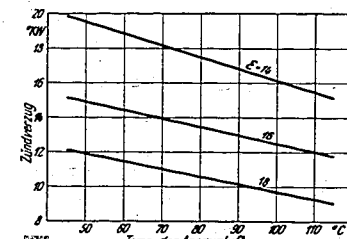


Bild 10 d. Einfluß der Ansauglufttemperatur. $n = 1800$ U/min.

Bild 10. Abhängigkeit des Zündverzugs von den motorischen Betriebsbedingungen bei unmittelbarer Einspritzung. FKFS-Prüfmotor.

Der Einfluß des Spritzbeginns ist durch den Verlauf der Brennraumtemperatur während der Verdichtung gegeben, die ähnlich wie der Verdichtungsdruck im Bereich des oberen Totpunkts einen Höchstwert überschreitet. Daher erreicht der Zündverzug für den Spritzbeginn, bei dem die höchste mittlere Temperatur herrscht, einen Kleinstwert. Für die vorliegenden Verhältnisse ist dies bei ungefähr 12° KW Spritzbeginn vor dem oberen Totpunkt der Fall (Bild 10 b).

Mit höherer Drehzahl wird in der Zeiteinheit mehr Kraftstoff umgesetzt, wodurch in geringem Maße eine Aufheizung der Ansaugluft eintritt, während durch das Sinken des Ansaugwirkungsgrades der Verdichtungsdruck zurückgeht. Die Einflüsse höherer Drehzahl wirken sich insgesamt in einem Erhöhen des Zündverzugs in Kurbelgraden aus (Bild 10 c); im Zeitmaß nimmt der Zündverzug zunächst ab.

Erhöhen der Ansauglufttemperatur bedingt bei adiabatischer Verdichtung ein stärkeres Erhöhen der Verdichtungsdrucktemperatur, dagegen wird die Luftdichte im umgekehrten Verhältnis

zur Temperatur herabgesetzt. Nach Bild 10 d wird mit höherer Ansauglufttemperatur eine gleichmäßige Abnahme des Zündverzugs erreicht.

Der Einfluß der Kühlwassertemperatur ist durch den geringen Einfluß der Wandtemperaturen auf die Lufttemperatur im Brennraum wesentlich schwächer und ist bei hohen Drehzahlen nicht mehr bemerkbar.

Die bis jetzt aufgeführten, Temperatur und Druck unmittelbar bestimmenden Größen können den Zündverzug entscheidend beeinflussen. Die übrigen Einflüsse sind am gleichen Motor unter gewöhnlichen Verhältnissen hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Zündverzug vernachlässigbar.

Die je Arbeitshub eingespritzte Kraftstoffmenge zeigte unter sonst gleichen Einspritzbedingungen praktisch keinen Einfluß, mit Ausnahme von Fällen, in denen mit schlechten Kraftstoffen, im äußersten Leerlauf oder infolge schlechter Zerstäubung kein ordnungsgemäßer Betrieb des Motors vorhanden war. Ebenso brachte ein Verändern des Einspritzdrucks im allgemeinen kein Verändern im Zündverzug. Die Unempfindlichkeit des Zündverzugs gegenüber einer gröberen oder feineren Zerstäubung des Kraftstoffs oder der eingespritzten Kraftstoffmenge erklärt sich wohl daraus, daß bei gegebener Temperatur das für die Zündung günstige Mischungsverhältnis bei der großen Verschiedenheit der einzelnen Tröpfchen an vielen Stellen des Brennraums vorhanden ist.

33 Einfluß des Verbrennungsverfahrens

Die einzelnen Verbrennungsverfahren zeigen bekanntlich unterschiedliches Verhalten beim Anlassen und beim Betrieb des Motors, ebenso auch verschiedene Kraftstoffempfindlichkeit. Wie bereits erwähnt, haben Temperatur und Druck der Verbrennungsluft entscheidenden Einfluß auf den Zündverzug, so daß man von der unterschiedlichen Ausbildung des Brennraums hauptsächlich insofern einen Einfluß auf den Zündverzug erwarten muß, als bei gleicher Gesamtverdichtung Temperatur und Druck an der Zündstelle bei den einzelnen Verfahren verschieden sein können.

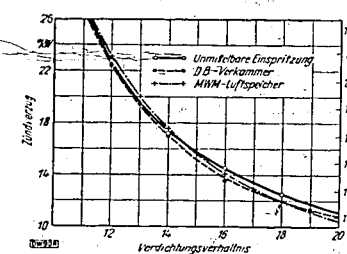


Bild 11. Zündverzug mit verschiedenen Verbrennungsverfahren in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis.

FKFS-Prüfmotor, $n = 1800$ U/min, Spritzbeginn 20° KW vor o. T., handelsübliches Gasöl, Cetanzahl 53. DB = Daimler-Benz, MWM = Motorenwerke Mannheim.

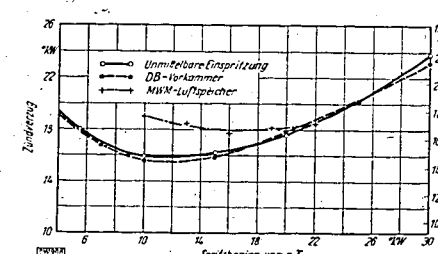


Bild 12. Zündverzug mit verschiedenen Verbrennungsverfahren in Abhängigkeit vom Spritzbeginn.

Für einen einwandfreien Vergleich ist es notwendig, daß alle Bedingungen, die nicht für die Eigenart des betreffenden Verbrennungsverfahrens kennzeichnend sind, gleichgehalten werden. Der FKFS-Dieselpfprüfmotor*) ist für solche Vergleiche besonders geeignet, da die Ausführung des Zylinderkopfs den Betrieb mit mehreren Verbrennungsverfahren ermöglicht.

Die Vergleichsmessungen mit drei verschiedenen Verbrennungsverfahren ergaben für ein handelsübliches Gasöl bei gleichem Spritzbeginn, der ungefähr der Höchstleistung entspricht, über den ganzen Verdichtungsdruckbereich Unterschiede im Zündverzug bis zu 1° KW (Bild 11). Der Zündverzug des Luftspeicherverfahrens weicht mit späterer Einspritzung von dem der übrigen beiden Verfahren ab (Bild 12), was jedoch auf einen meßtechnischen Mangel zurückzuführen sein dürfte, denn beim Luftspeicherverfahren wurde die Zündung durch den Luftspeicher hindurch aufgenommen; sie tritt aber bei später

*) FKFS = Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren an der Technischen Hochschule Stuttgart.

Einspritzung stets zuerst im Brennraum und dann erst im Speicher auf, wie schon im vorhergehenden nachgewiesen wurde.

Bei Vergleichsmessungen mit Kraftstoffen verschiedener Herkunft, von größerer und geringerer Zündwilligkeit, wurden größere Unterschiede im Zündverzug (bis zu 2° KW) festgestellt. Die kleineren Zündverzögerungen wurden dabei vom Vorkammer- und Luftspeicherverfahren erreicht.

Das Verbrennungsverfahren hat demnach auf den Zündvorgang einen verhältnismäßig kleinen Einfluß, der jedoch bei den einzelnen Kraftstoffarten verschieden ist. Die auf eine Verkürzung des Zündverzugs hinwirkenden Eigenschaften, z. B. die höhere Temperatur der Vorkammer, werden durch entgegengesetzte Einflüsse — wie niedrigerer Druck infolge Drosselung, größerer Abgasanteil — weitgehend ausgeglichen. Sind feststellbare Unterschiede vorhanden, so ergeben stets die Verfahren mit unterteiltem Brennraum die kleineren Zündverzögerungen. Die Bewertung des Kraftstoffs geschieht daher zweckmäßig bei unmittelbarer Einspritzung, weil dann in jedem Fall die strengste Beurteilung durchgeführt wird.

34 Einfluß inerte Gase

Im allgemeinen sind in der verdichteten Frischluft des Brennraums nur geringe Mengen bereits verbrannter Gase enthalten. Diese Anteile können jedoch bei schlechtem Zustand des Motors oder bei unpassenden Steuerzeiten größer werden. Der Abgasanteil ist beim Zweitaktmotor größer als beim Viertaktmotor. Bei unterteiltem Brennraum enthält der abgeschnürte Teil, in dem bei Vorkammer- und Wirbelkammeranordnung die Zündung erfolgt, ebenfalls mehr Abgas, da er nicht genügend ausgespült wird.

Eine versuchsmäßige Veränderung der Einzelanteile des angesaugten Sauerstoff-Stickstoff-Gemisches ergibt den auf Bild 13 dargestellten Zusammenhang mit dem Zündverzug. Von einem Sauerstoffgehalt von mehr als 50 % ist nur noch eine geringe Abnahme des Zündverzugs zu erwarten, während unterhalb 10 % Sauerstoffgehalt der Zündverzug stark ansteigt. Die Wirksamkeit der einzelnen

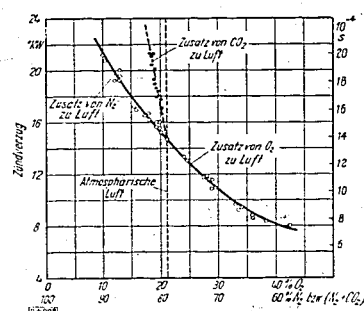


Bild 13. Zündverzug in Abhängigkeit vom Sauerstoff-Stickstoff-Verhältnis. FKFS-Prüfmotor, unmittelbare Einspritzung, $\epsilon = 15$, $n = 1800$ U/min.

inerten Gase auf den Zündverzug ist unterschiedlich. Durch Zusatz von Kohlensäure zur angesaugten Luft wird gegenüber Stickstoff ein erheblich steilerer Anstieg des Zündverzugs erreicht, wie ebenfalls aus Bild 13 ersichtlich ist.

Nach Gl. 7 ergibt die Erhöhung des Anteils an inerten Gasen eine Verkürzung des Zündverzugs, wenn die zugeführte Luft mengenmäßig gleich bleibt, der Zusatz von inertem Gas also durch Erhöhung des Anfangsdrucks erfolgt.

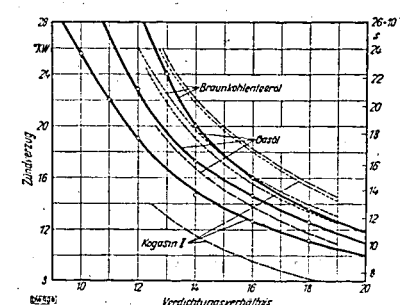
Bei der Kraftstoffbewertung muß also auch auf die den Abgasanteil verändernden Einflüsse geachtet werden.

35 Einfluß des Kraftstoffs

Die bis jetzt aufgeführten Einflüsse wirken sich auf den Zündverzug im allgemeinen in der Weise aus, daß sie die Vorgänge im Kraftstoffluftgemisch beschleunigen oder verzögern. Die Art der Vorgänge, die in ihrem genauen Ablauf nur unvollkommen bekannt, naturgemäß den Zeitraum bis zur Entzündung entscheidend beeinflussen, sind von der Kraftstoffseite her bestimmt. Entsprechend

ihren physikalischen Eigenschaften und ihrer chemischen Zusammensetzung ergeben daher die Kraftstoffe bei einer bestimmten motorischen Einstellung Zündverzögerungen verschiedener Größe. Auch die Gesetzmäßigkeit der Veränderung des Zündverzugs beim Ändern der motorischen Einstellung, also von Temperatur und Druck während des Zündverzugs, kann für einzelne Kraftstoffe — insbesondere solche unterschiedlicher Herkunft — verschieden sein [13].

Diese Abhängigkeiten sind für Schwebbenzin, für ein handelsübliches Gasöl sowie für Braunkohlenteeröl, also für Kraftstoffe, die sowohl ihrer Herkunft als auch der Zusammensetzung nach verschieden sind, für die Verhältnisse am FKFS-Dieselprüfmotor bei unmittelbarer Einspritzung untersucht worden und in Bild 14 dargestellt. Die Gesetzmäßigkeit des Zündverzugsverlaufs ist für alle drei Kraftstoffe nahezu gleich. Die Unterschiede im Zündverzug werden mit höherer Verdichtung immer kleiner, die Kurven streben also einem gleichen Kleinstwert zu. Auch bei Änderung des Spritz-



o gemessene Werte
— errechnete Werte ohne Berücksichtigung der Zündwilligkeit
--- " " mit " "

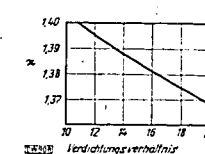


Bild 15. Verdichtungs-exponent x bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen.

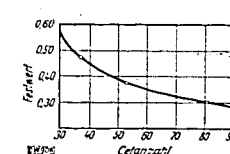


Bild 16. Veränderung des Festwertes von Gl. 6a mit der Zündwilligkeit (Cetanzahl) nach den Meßergebnissen von Bild 14.

Bild 14 (links). Zündverzug verschiedener Kraftstoffe bei Änderung des Verdichtungsverhältnisses. Spritzbeginn 18° KW vor o. T., $n = 1800$ U/min.

beginns zeigen diese Kraftstoffe einen ähnlichen Verlauf. Mit größerer Zündwilligkeit werden bei gleichbleibender Verdichtung die Unterschiede im Zündverzug für gleichen Cetanzahlunterschied kleiner, sind aber noch deutlich vorhanden.

Eine Berechnung dieser Zündverzögerungen nach Neumann und Egerer (Gl. 6) erfordert die Kenntnis der im Brennraum während des Zündverzugs herrschenden Drücke und Temperaturen. Diese wurden auf folgende Weise ermittelt:

Der Verdichtungsanfangsdruck wurde mit Unterdruckgebern zu 0,935 ata festgestellt. Aus den für verschiedene Verdichtungsverhältnisse gemessenen Verdichtungsdruckverläufe ergab sich der Verlauf des Exponenten x (Bild 15). Damit kann für jedes Verdichtungsverhältnis der Verlauf des Verdichtungsdrucks, zumindest in der Gegend des oberen Totpunkts, mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Die Anfangstemperatur der Verdichtung wurde unter Berücksichtigung der Aufheizung durch den Abgasrest und die Brennraumwände zu 318° K errechnet. Da der Exponent x bekannt ist, kann auch der Temperaturverlauf für jedes Verdichtungsverhältnis ermittelt werden; allerdings ist hier die Genauigkeit geringer als beim Verdichtungsdruck.

Für die Berechnung der Zündverzögerungen wurden die Mittelwerte von Druck und Temperatur zugrunde gelegt, die sich durch Integration des Druck- und Temperaturverlaufs zwischen dem im Versuch gemessenen Spritzbeginn (18° KW vor o. T.) und dem Zündpunkt ergaben.

Bei Braunkohlenteeröl (Cetanzahl $C_a = 37$) ist z. B. beim Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 14$ während des Zündverzugs der mittlere Druck $p_m = 31,4$ ata, die mittlere Temperatur $T_m = 850$ ° K. Damit ist mit den Werten von Volfer (Gl. 6a) der errechnete Zündverzug ohne Berücksichtigung der Zündwilligkeit

$$z_r = 17,3 \cdot 10^{-4} \text{ s.}$$

z_r' gilt für Kraftstoffe mit einer Cetanzahl $C_a > 43$ (Cetanzahl $C_a > 50$). Reduziert man nach *Wolfer* auf die zugehörige Cetanzahl, so ergibt sich

$$z_r = 20,1 \cdot 10^{-4} \text{ s.}$$

Der gemessene Zündverzugs ist

$$z_m = 18,5 \cdot 10^{-4} \text{ s.}$$

In Bild 14 sind für den gesamten gemessenen Bereich auch die errechneten Zündverzugswerte eingezeichnet, sowohl ohne Berücksichtigung der Zündwilligkeit, als auch — nach einem Vorschlag von *Wolfer* — im umgekehrten Verhältnis der Cetanzahlen reduziert. Für Gasöl und Braunkohlenteeröl stimmen neben den Einzelwerten auch der errechnete Verlauf des Zündverzugs mit dem gemessenen befriedigend überein, während für Kogasin I die Werte mehr voneinander abweichen.

Nach den vorliegenden Messungen erhält man eine bessere Übereinstimmung, wenn man in Gl. 6 a die Zündwilligkeit des Kraftstoffs durch Verwendung des in Bild 16 angegebenen Festwerts berücksichtigt. Der von *Wolfer* ermittelte Festwert 0,44 gilt also nach den vorliegenden Meßwerten nur für Kraftstoffe von der Cetanzahl $C_a = 43$ (Cetanzahl $C_a = 50$).

Das Verhalten der Kraftstoffe bei der Umsetzung im Motor wird im wesentlichen durch die Auswertung dieser sowohl bei der Messung sich ergebenden, als auch durch die Rechnung bestätigten Unterschiede im Zündverzug beurteilt.

4 Bewertung des Kraftstoffs

41 Allgemeine Gesichtspunkte

Die eingehende Beurteilung der motorischen Eignung eines Kraftstoffs erstreckt sich auf alle Eigenschaften, die den Ablauf der Vorgänge im Motor kraftstoffseitig beeinflussen können. Man ist bestrebt, diese Beurteilung mit wenigen Meßgrößen und bei geringem Aufwand durchzuführen, und sucht daher, sie auf physikalische und chemische Größen zurückzuführen, die mit einfachen Laboratoriumsverfahren festgestellt werden können.

Auf diesem Weg können hauptsächlich physikalische Eigenschaften des Kraftstoffs — wie Zähigkeit, Heizwert, Korrosionsneigung, Stockpunkt — zuverlässig gekennzeichnet werden. Dagegen sind ihre Zusammenhänge mit den Verbrennungseigenschaften im Motor nicht soweit geklärt, daß Laboratoriumsverfahren für eine allgemein gültige Bewertung verwendet werden können. Auch die Verkokungsneigung ergab neuerdings bei Prüfung unter motorischen Verhältnissen wesentliche Abweichungen gegenüber den Laboratoriumswerten [17]. Die Eigenschaften des Kraftstoffs, die die motorische Umsetzung bestimmen, müssen daher auch heute unter Bedingungen geprüft werden, die grundsätzlich den Verhältnissen im Motor entsprechen.

Während die Laboratoriumsverfahren die unmittelbare Bestimmung von Absolutwerten ermöglichen, erweist es sich bei der motorischen Prüfung neben dem größeren Aufwand weiterhin nachteilig, daß infolge der gegenüber Veränderungen der Betriebsverhältnisse sehr empfindlichen Vorgänge nur Verhältniszahlen (Cetanzahl, Oktanzahl) ermittelt werden können. Die Cetanzahl eines Kraftstoffs wird beim praktischen Prüfverfahren in der Regel in einer Einpunktmessung bestimmt, d. h. bei einem Betriebszustand. Kraftstoffe können jedoch sowohl untereinander als auch gegenüber den Eichkraftstoffen eine unterschiedliche Abhängigkeit der Zündwilligkeit von Druck oder Temperatur der Verbrennungsluft aufweisen [13]. Daher kann auch die Bewertung bei verschiedenen Betriebszuständen unterschiedliche Prüfwerte ergeben. Für das praktische Prüfverfahren ergibt sich infolgedessen die Forderung, daß die Bewertung eines einzelnen Kraftstoffs gegebenenfalls bei verschiedenen Betriebszuständen durchgeführt werden kann. Im Falle der Einpunktmessung müssen die Prüfbedingungen mit den im gewöhnlichen Motorbetrieb vorliegenden Verhältnissen möglichst weitgehend übereinstimmen.

42 Prüfung der Dieseldieselkraftstoffe

Wie sich aus den heute vorliegenden Erkenntnissen ergibt, sind für die Verbrennungsverfahren mit Selbstzündung des Kraftstoffs zwei Vorgänge der Umsetzung bestimmend:

Die Zündung und die Flammenausbreitung mit dem weiteren Verbrennungsablauf.

Die zur Zündung führenden, in der Hauptsache von selbst ablaufenden Vorgänge bilden in ihrer zeitlichen Ausdehnung den Zündverzug und setzen sich aus den physikalischen Vorgängen der Zerstäubung, Aufheizung, Verdampfung und weiteren Aufheizung und aus der mit zunehmender Geschwindigkeit vor sich gehenden chemischen Umsetzung, der sog. Induktionszeit, zusammen. Die

Frage der Anteile des physikalischen und des chemischen Zündverzugs ist heute noch umstritten. Einerseits beanspruchen nach den Ergebnissen der Motorenforschung die physikalischen Vorgänge nur einen kleinen Teil des Zündverzugs, so daß der Zündverzug danach im wesentlichen durch chemische Vorgänge bedingt sein muß [14]; dies bestätigen auch die Meßergebnisse in Bild 14: die Kraftstoffe weisen geringe Unterschiede in ihren physikalischen Eigenschaften, dagegen wesentliche in ihrer chemischen Zusammensetzung und damit auch im gesamten Zündverzug auf.

Andererseits ist auch nach den Untersuchungen der physikalischen Chemie die Umsetzungsgeschwindigkeit der einzelnen Kraftstoffarten verschieden; jedoch ist nur im Gebiet niedriger Temperaturen die chemische Umsetzung der langsamste Vorgang und damit geschwindigkeitsbestimmend. Bei höheren Temperaturen, wie sie für den belasteten Motor zutreffen, würde die chemische Umsetzung so rasch ablaufen, daß im wesentlichen die physikalischen Vorgänge für den Zündverzug maßgebend sind, daher auch Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung sich nicht mehr auswirken können [12].

Die Kenntnis der Einzelvorgänge und ihres Einflusses auf die Gesamtdauer des Zündverzugs ist für verbrennungstechnische Aufgaben, damit auch für die Einstufung des Kraftstoffs, von wesentlicher Bedeutung. Solange eine genaue Analyse nicht möglich ist und verfahrensmäßig festliegt, ist man bei einer Wertung der ersten Umsetzungsform des Kraftstoffs ausschließlich auf die Erfassung des Gesamtvorgangs angewiesen.

Für die praktische Prüfung am Motor [9] — die Verbrennungsgefäße kommen hierfür wegen zu großen Aufwandes nicht in Betracht — ergeben sich zwei Verfahrensarten²⁾.

1. Der Kraftstoff wird nach der Höhe der Verdichtung bewertet, die zur Einhaltung eines festliegenden Zündverzugs eingestellt werden muß (Verfahren der I. G. Farbenindustrie).
2. Die Bewertung geschieht nach der Länge des Zündverzugs, der sich bei einer gewählten Verdichtung ergibt.

Das erste Verfahren hat einige meßtechnische Vorteile. Der als Eichkurve dienende Zusammenhang zwischen der Kolbenstellung im oberen Totpunkt, die das Verdichtungsverhältnis bestimmt, und der Cetanzahl ist geradlinig. Die für einen Kraftstoff sich ergebende Verdichtungsstellung kann einfach und genau festgestellt werden. Das Verfahren ist jedoch ein ausgesprochenes Ein-Punkt-Verfahren. Sehr zündwillige Kraftstoffe werden nur bei niedriger Verdichtung, zündträge Kraftstoffe nur bei hoher Verdichtung bewertet. Der praktisch in Frage kommende Bereich der Verdichtung liegt zwischen $\varepsilon = 10$ und 25, deshalb sind auch Druck und Temperatur der Verbrennungsluft entsprechend verschieden, woraus sich, wie später gezeigt wird, eine unterschiedliche Bewertung des Kraftstoffes ergeben kann. Mit der Verdichtung wird auch der Brennraum selbst verändert. Die Bestimmung des Zündverzugs wird dadurch erleichtert, daß der Verbrennungseinsatz in die Nähe des oberen Totpunktes gelegt wird. Beim Verfahren der I. G. Farbenindustrie wird der Zündverzug vom Beobachter selbst dem Druckverlauf entnommen, dies ergibt gewisse Schwierigkeiten, auf die bei der Bestimmung des Zündverzugs schon hingewiesen wurde.

Das Verfahren des Stuttgarter Forschungsinstituts wurde nach der zweiten Art unter Verwendung des von ihm entwickelten Zündverzugsmeßgeräts ausgebildet, da hierbei der Kraftstoff innerhalb seiner Zündgrenzen bei beliebiger Verdichtung bewertet werden kann. Auch ist zu erwarten, daß eine raschere Prüfung möglich ist, da die Motoreinstellung jeweils unverändert bleibt.

Für eine Cetanzahlbestimmung werden im allgemeinen folgende Betriebsbedingungen eingestellt:

1. Drehzahl 1800 U/min,
2. Voreinspritzwinkel 20° KW,
3. Verdichtungsverhältnis 13,
4. Temperatur der Ansaughluft 45° C,
5. Temperatur des Kühlwassers und des Schmieröls 70° C,
6. Einspritzmenge 35 mm³ je Arbeitshub,
7. Einspritzdruck 180 atü.

Für die Prüfung wird der FKFS-Dieselpförmotor mit 1040 cm³ Hubraum verwendet, der so gebaut ist, daß gegebenenfalls alle Betriebsgrößen beliebig verändert werden können [25].

Entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen wird der Kraftstoff bei unmittelbarer Einspritzung bewertet. Bei der Prüfung ist besonders auf genauestes Einhalten der Drehzahl und des

²⁾ Von den übrigen motorischen Verfahren kann abgesehen werden, da sich praktisch nur die unmittelbaren Zündverzugsverfahren behaupten konnten.

Spritzbeginns zu achten, während die übrigen Betriebsgrößen geringeren Einfluß haben. Im allgemeinen kann auf ein genaues Einhalten der Temperatur der Ansaugluft, der Einspritzmenge und des Einspritzdrucks verzichtet werden. Zur genauen Spritzanzeige wurde am FKFS-Prüfmotor eine mit dem Schwungrad umlaufende, durch den Einspritzkontakt gesteuerte Glühlampe angebracht.

Die Meßgenauigkeit der Prüfung kann bei entsprechendem Zeitaufwand bis auf Bruchteile von Cetanzahlen gebracht werden, indem der Kraftstoff durch in der Zündwilligkeit sehr nahe beieinanderliegende Bezugskraftstoffe eingegrenzt wird.

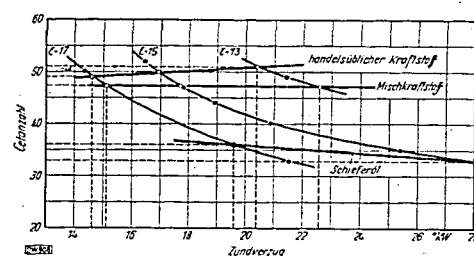


Bild 17. Bewertung des Kraftstoffs bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ϵ .

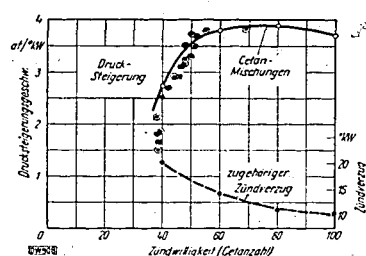


Bild 18. Drucksteigerungsgeschwindigkeit von Cetanmischungen (obere Kurve) und einer Anzahl Kraftstoffen (beringte Punkte) bei verschiedener Zündwilligkeit (Cetanzahl C_{50}). Spritzbeginn 20° KW vor o. T., $\epsilon = 14$, $n = 1800$ U/min.

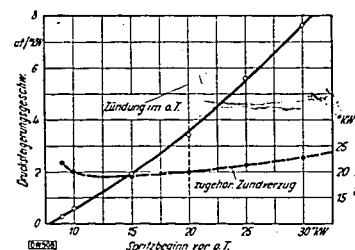
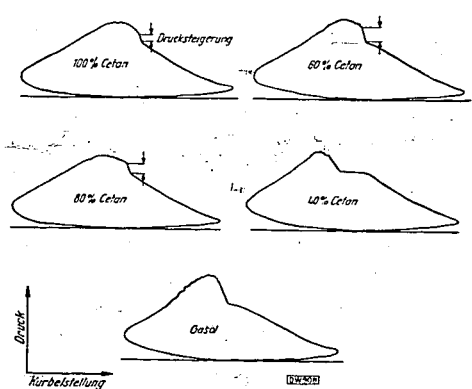


Bild 19. Drucksteigerungsgeschwindigkeit bei Änderung des Spritzbeginns.

Bild 20 (Bildgruppe rechts). Druckverlauf der Bezugsmischungen aus Cetan und α -Methylnaphthalin. FKFS-Prüfmotor, $n = 1800$ U/min, Spritzbeginn 20° KW vor o. T.



Durch die Cetanzahlbestimmung bei mehreren Verdichtungen erhält man einen Einblick in das Verhalten des Kraftstoffs über ein größeres Druck- und Temperaturgebiet. Ändert sich hierbei die Cetanzahl, so ist die Abhängigkeit der Zündwilligkeit des Kraftstoffs von der der Cetanmischung verschieden. Bild 17 zeigt das Ergebnis einer solchen Prüfung. Ist die Kennlinie des Kraftstoffs nach rechts unten geneigt (Schieferöl), so wird seine Zündwilligkeit gegenüber der des entsprechenden Bezugskraftstoffs bei Abnahme der Verdichtung schlechter. Diese Unterschiede können als Grund für die unterschiedliche Bewertung nach den einzelnen Prüfverfahren angesehen werden.

Die beste Kennzeichnung des Zündverhaltens eines Kraftstoffs ist durch eine Auswertung der Zündverzugsmessung mit Hilfe der Gleichungen für den Zündverzug (z. B. Gl. 6) zu erwarten. Neben dem Festwert dieser Gleichung ergibt der Temperaturbeiwert E/R und der Druckbeiwert n die

Empfindlichkeit des Kraftstoffs auf Veränderung der Umsetzungsbedingungen. Diese Kennzeichnung des Kraftstoffs erfolgt also auf physikalischer Grundlage, die Ermittlung des Festwertes allein nach Bild 16 würde nur einen empirischen Wert ergeben. Bei der Feststellung der Zustandsgrößen auf dem in Abschnitt 35 beschriebenen Weg zeigte sich jedoch, daß die Temperatur im Motor während des Zündverzugs heute noch nicht mit der Genauigkeit festgestellt werden kann, die für diese Art von Kraftstoffbewertung notwendig ist.

Der zweite Umsetzungsvorgang des Kraftstoffs, die Flammenausbreitung mit dem weiteren Verbrennungsablauf, kann im Falle der Selbstzündung, die im allgemeinen mehrere Zündstellen und daher keine einheitliche Flammenfront aufweist, aus dem gesamten Wärmeumsatz durch Verfolgen der Drucksteigerungsgeschwindigkeit erfaßt werden. Diese Größe ist jedoch abhängig von der im Augenblick der Zündung zugeführten Kraftstoffmenge, die wieder durch die Länge des Zündverzugs und die Gesetzmäßigkeit der Einspritzung bestimmt ist. Man kann also von vornherein nur einen verminderten Einfluß des Kraftstoffs selbst erwarten.

Die Drucksteigerungsgeschwindigkeit der Cetanmischungen unter den Verhältnissen des FKFS-Zündverzugsverfahrens ergibt den auf Bild 18 eingezeichneten Verlauf. Der Höchstwert der Drucksteigerungsgeschwindigkeit liegt bei dem auch im praktischen Motorbetrieb zulässigen Wert von 4 at/KW. Der starke Abfall bei niedrigen Cetanzahlen ist auf die späte Zündung zurückzuführen, die hier erst während des Abwärtsganges des Kolbens erfolgt. In Bild 18 ist ferner die mittlere Drucksteigerungsgeschwindigkeit einer größeren Zahl von Kraftstoffen an der Stelle der zugehörigen Cetanzahl eingetragen (durch Ringe gekennzeichnet). Hieraus ergibt sich, daß die Geschwindigkeit der Drucksteigerung in erster Näherung bereits durch die Zündwilligkeit festliegt.

Der genaue Wert der Drucksteigerungsgeschwindigkeit ist außerordentlich empfindlich gegenüber geringen Veränderungen des Betriebszustandes, insbesondere der Einspritzverhältnisse. Wird z. B. der Voreinspritzwinkel von 15 auf 20° KW verändert, so ändert sich die Geschwindigkeit der Drucksteigerung von 2,0 auf 3,6 at/KW, also wesentlich stärker als der zugehörige Zündverzug (Bild 19). Die Einspritzgesetzmäßigkeit, die Zerstäubung, Mischung usw. werden auch durch die physikalischen Eigenschaften der Kraftstoffe (z. B. Zähigkeit) beeinflusst; deshalb dürfen die vorhandenen Unterschiede in der Drucksteigerungsgeschwindigkeit für Kraftstoffe gleicher Zündwilligkeit nicht ohne weiteres auf chemische Eigenschaften zurückgeführt werden.

Für die Cetanmischungen (Bild 18) ist die Geschwindigkeit der Drucksteigerung in einem größeren Gebiet der Zündwilligkeit, in dem der Druck- und Temperaturzustand ungefähr gleich bleibt, praktisch unverändert, also unabhängig vom Mischungsverhältnis und damit auch von der chemischen Zusammensetzung; lediglich die Dauer des steilen Druckanstiegs wird mit abnehmender Cetanzahl infolge des größeren Zündverzugs länger, wie aus Bild 20 hervorgeht.

Man kann insgesamt feststellen, daß Abweichungen von den üblichen Werten der Drucksteigerungsgeschwindigkeit auftreten, daß es aber infolge der Überlagerung anderer Einflüsse, Ungleichförmigkeiten usw., schwierig ist, eine Bewertung des Kraftstoffs daraus abzuleiten. Zudem ist es nicht möglich, von dem Verhalten des Kraftstoffs in einem Motor auf das Verhalten in einem anderen Motor zu schließen [6]. Man wird sich daher allgemein auf die Bestimmung der Zündwilligkeit beschränken und nur im besonderen Fall die Geschwindigkeit der Drucksteigerung beim verwendeten Motorverfahren untersuchen.

43 Prüfung der Ottokraftstoffe

Beim Verwenden eines Kraftstoffs im Ottomotor wird seine Bewertung nach der Klopfestigkeit durchgeführt. Die allgemein gebräuchlichen Prüfverfahren bestimmen hierzu die Klopfgrenze unter festgelegten Bedingungen mit Hilfe des Springstabs.

Nach den heute vorliegenden Erkenntnissen [5, 21] ist das Klopfen als reiner Selbstzündungsvorgang in Form einer Druckzündung anzusehen. Die Klopfestigkeit des Kraftstoffs kann daher auch als Widerstand gegen die Selbstzündung oder als Zündträgheit und damit als begrifflich mit der Zündwilligkeit aufgefaßt werden. Der versuchsmäßig festgestellte Zusammenhang zwischen Klopfestigkeit und Zündwilligkeit (Bild 21), der auch aus Arbeiten von Boerlage [4] und Wilke [23] bekannt ist, ist ein Beweis für die Richtigkeit dieser Auffassung.

Auf Grund dieser Erkenntnisse ist es naheliegend, auch den Ottokraftstoff nach dem Druckzündungsverfahren, also unmittelbar nach seiner im Zündverzug sich äußernden ersten Umsetzungsform, zu bewerten.

Bild 22 zeigt das Ergebnis einer Meßreihe mit Mischungen aus Eichbenzol und -benzin, bei der zunächst der Zündverzug als Cetanzahl und dann aus Bild 21 die zugehörige Oktanzahl ermittelt wurden [22]. Als Vergleich hierzu sind die nach dem Springstabverfahren im I. G.-Prüfmotor sich ergebenden Werte aufgetragen. Abgesehen von den Unterschieden im unteren Teil des Verlaufs, die wahrscheinlich auf die Springstabmessung zurückzuführen sind, ergibt sich eine brauchbare Übereinstimmung beider Meßverfahren. Die aus dem Zündverzug ermittelte Klopfestigkeit liegt um 1 bis 2 Einheiten der Oktanzahl höher, da sich bei der beschriebenen Prüfweise die höhere Verdampfungswärme des Ottokraftstoffs im Sinne einer Oktanzahlerhöhung auswirkt. Diese Abweichung läßt sich dadurch vermeiden, daß die Oktanzahl im Zündverzugsverfahren unmittelbar bestimmt wird; d. h. statt des Umwegs über die Cetanzahl werden als Vergleichswerte die Zündverzüge der entsprechenden Oktanmischungen bzw. deren Ersatzmischungen festgestellt.

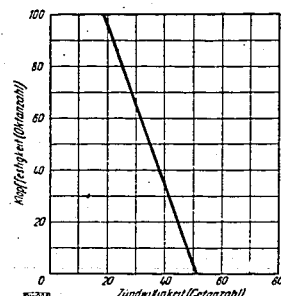


Bild 21. Zusammenhang zwischen Klopfestigkeit und Zündwilligkeit der üblichen Bezugsmischungen. FKFS-Prüfmotor.

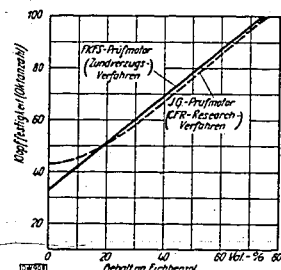


Bild 22. Klopfestigkeit von Mischungen aus Eichbenzol und -benzin nach dem Zündverzugs- und dem Springstabverfahren.

Beim Anwenden dieses Verfahrens für Ottokraftstoffe ist es zweckmäßig, zur Verhinderung von Meßfehlern und Störungen durch Dampfblasenbildung am Prüfmotor eine Benzineinspritzanlage einzubauen. Wo dies nicht möglich ist, muß die vorhandene Dieseleinspritzanlage zusätzlich gekühlt werden.

Das vorgeschlagene Verfahren kann noch keinen Anspruch darauf erheben, den gesamten Bereich der flüssigen Kraftstoffe zu umfassen, da ausreichende Erfahrungsgrundlagen noch nicht vorliegen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen jedoch, daß es aussichtsreich erscheint, in Anbetracht der Vorteile gegenüber der üblichen Prüfung — gemeinsames Verfahren für Otto- und Dieselmotoren, Möglichkeit der Bewertung über ein größeres Druck- und Temperaturgebiet — die Anwendung dieses Verfahrens weiter zu klären.

5 Zusammenfassung

Die heute vorliegenden Erkenntnisse über den Zündverzug erstrecken sich auf die physikalischen sowie die chemischen Vorgänge. Eine rechnerische Erfassung ist bis jetzt nur hinsichtlich der reaktionskinetischen Vorgänge möglich.

Zur genaueren Bestimmung des Zündverzugs, die nur am Motor selbst möglich ist, wurden verschiedene Meßverfahren untersucht. Zunächst zeigte sich, daß die in Frage kommenden Meßverfahren bei richtigem Anwenden praktisch mit der gleichen Genauigkeit arbeiten. Nach den Messungen im stark zerklüfteten Brennraum eines Luftspeichermotors, die einen weitgehenden Einblick in den Ablauf der Vorgänge ergaben, verlagert sich jedoch der Ort der ersten Zündung mit Verändern des Spritzbeginns; hierauf muß beim Einsatz der verschiedenen Verfahren Rücksicht genommen werden. Das Strahlungsmeßverfahren eignete sich dann für die räumliche Erfassung und Anzeige des Zündbeginns am besten.

Auch die gestellte Aufgabe, ein Meßgerät zur fortlaufenden und selbsttätigen Anzeige des Zündverzugs zu entwickeln, konnte nur mit diesem Verfahren gelöst werden. Nach den Untersuchungen, die sich auf alle praktisch vorkommenden Betriebszustände erstreckten, ist dieses Verfahren bei richtiger Anwendung allgemein verwendbar und gültig.

Der Zündverzug wird hauptsächlich von der Temperatur der Verbrennungsluft und weiter vom Druck beeinflusst. Hieraus ergeben sich im wesentlichen die Abhängigkeiten für die motorischen Betriebsbedingungen. Während die verschiedenen motorischen Verbrennungsverfahren einen verhältnismäßig geringen Einfluß auf den Zündverzug haben, ist der weitere Ablauf der Verbrennung wesentlich vom Verbrennungs- und Einspritzverfahren bestimmt. Reste verbrannter Gase im Brennraum vergrößern den Zündverzug, wie durch Zusätze von inerten Gasen festgestellt werden konnte.

Die Beurteilung der Zündwilligkeit verschiedener Kraftstoffe nach ihrem Zündverzug wurde mit dem am Stuttgarter Forschungsinstitut entwickelten Verfahren, bei dem die Größe des Zündverzugs bei jeweils gleichbleibender Verdichtung bestimmt wird, durchgeführt. Dabei ergaben sich für einzelne Kraftstoffe unterschiedliche Cetanzahlen bei Anwendung verschiedener Verdichtungen.

Eine erste Bewertung des Kraftstoffs sollte demnach stets bei gleicher Verdichtung, eine eingehendere Beurteilung zweckmäßigerweise bei verschiedenen Verdichtungen erfolgen. Diese Messungen können mit dem beschriebenen Verfahren einfach durchgeführt werden.

Drucksteigerungsgeschwindigkeit und Zündverzug hängen zusammen. Deshalb ist eine zusätzliche Bewertung der Drucksteigerungsgeschwindigkeit im allgemeinen nicht notwendig.

Von der Schaffung eines Verfahrens zum genauen Bestimmen der Temperatur im Brennraum während des Zündverzugs kann ein besseres Bewerten des Kraftstoffs durch Kennzahlen, die auf physikalischen Grundlagen beruhen, erwartet werden, wie erste Ansätze beweisen.

Auf Grund des schon mehrfach festgestellten Zusammenhangs zwischen Zündwilligkeit und Klopfestigkeit kann die Klopfestigkeit von Ottokraftstoffen durch die Zündverzugsmessung einfach und schnell bestimmt werden, wie zahlreiche erfolgreiche Messungen beweisen, so daß sich für Diesel- und Ottokraftstoffe ein gemeinsames Prüfverfahren ergibt.

6 Schriftumsverzeichnis

- [1] Bisang, L.: Untersuchung der Ausstrahlung des Verbrennungsraumes schnelllaufender Diesel- und Otto-Motoren — In: Dtsch. Kraftf.-Forsch. H. 4, Berlin: VDI-Verlag 1938, S. 27/47.
- [2] Bodenstein, M.: Eine Theorie der photochemischen Reaktionsgeschwindigkeiten — Z. phys. Chem. Bd. 85 (1913) S. 329/97.
- [3] Bodenstein, M.: Die reaktionskinetischen Grundlagen der Verbrennungsvorgänge — In: Berichtsheft 41. Hauptversammlung Dtsch. Bunsengesellschaft, Berlin: Verlag Chemie 1936.
- [4] Boerlage, G. D. und J. J. Broeze: Zündung und Verbrennung im Dieselmotor — In: VDI-Forsch.-Heft 366 (Zündung und Verbrennung im Motor), Berlin: VDI-Verlag 1934, S. 6/13.
- [5] Broeze, J. J., H. van Driel und L. A. Pelletier: Betrachtungen über den Klopfvorgang im Otto-Motor — In: Schriften Dtsch. Akad. Luftf.-Forsch. H. 9, München/Berlin: R. Oldenbourg 1939, S. 187/206.
- [6] Broeze, J. J.: Aussprachebeitrag zum Vortrag W. Lindner: Beurteilung der Kraftstoffe nach ihren Zünd- und Brenneigenschaften (S. 313/49) — In: Schriften Dtsch. Akad. Luftf.-Forsch. H. 9, München-Berlin: R. Oldenbourg 1939, S. 356.
- [7] Dreyhaupt, F.: Vorgänge im Verbrennungsraum beim Lanova-Dieselmotor — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 9 (1938) S. 1/13.
- [8] Dreyhaupt, F.: Wirkung des Luftspeichers auf die Verbrennung in Luftspeicher-Dieselmotoren — Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 183/86.
- [9] Ernst, H.: Über die Prüfung von Dieselmotoren — Autom.-techn. Z. Bd. 42 (1939) S. 213/21.
- [10] Graff, H.: Ein neues Verfahren zur Gastemperaturmessung in Otto-Motoren — Diss. T. H. Stuttgart 1940.
- [11] Herle, L.: Zündverzug und Ausbeutung der Verbrennung im Dieselmotor mit Strahlinspritzung — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 10 (1939) S. 15/27.
- [12] Jost, W.: Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Verbrennung im Motor — In: Motor und Kraftstoff, Berichtsheft der Wissenschaftlichen Herbsttagung 1938 des VDI in Augsburg, Berlin: VDI-Verlag 1939, S. 50/58.
- [13] Lindner, W.: Grundlagen der Prüfung und Bewertung der flüssigen Kraftstoffe — Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 25/32; auch in: Motor und Kraftstoff, Berichtsheft der Wissenschaftlichen Herbsttagung 1938 des VDI in Augsburg, Berlin: VDI-Verlag 1939, S. 2/10 (mit Aussprachebeiträgen).
- [14] Nügel, A.: Neuere Versuche über die Entstehung und den Ablauf der dieselmotorischen Verbrennung — In: Schriften Dtsch. Akad. Luftf.-Forsch. H. 9, München/Berlin: R. Oldenbourg 1939, S. 265/80.

- [15] Neumann, M. und L. Egerov: Untersuchungen der Induktionsperiode bei der Wärmeentzündung von Gasgemischen — Phys. Z. Sowjet. Bd. 1 (1932) S. 700/17.
- [16] Pretre, M.: Facteurs physiques et chimiques intervenant dans l'inflammation et la combustion des mélanges carburés — Mécanique Bd. 21 (1937) S. 220/24.
- [17] Schmidt, A. W. und F. Kneule: Beitrag zur motorischen Bewertung von Dieselloftstoffen — Öl u. Kohle Bd. 14 (1938) S. 1034/41.
- [18] Schmidt, F. A. F.: Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündverzug und Klopfvorgang — In: VDI-Forsch.-Heft 392 (Zündverzug und Klopfen im Motor), Berlin: VDI-Verlag 1938, S. 1/14.
- [19] Semenov, N.: Chemical kinetics and chain reactions — Oxford 1935.
- [20] Ubbelohde, A. R.: Investigations on the combustion of hydrocarbons — Proc. roy. Soc., Lond. (A) Bd. 152 (1935) S. 354/402.
- [21] Weinhart, H.: Das Klopfen im Otto-Motor — Luftf.-Forsch. Bd. 16 (1939) S. 74/83.
- [22] Widmaier, O.: Zündverzugsmessungen an Diesel- und Ottokraftstoffen — In: Dtsch. Kraftf.-Forsch. H. 63 (vorliegendes Heft), Berlin: VDI-Verlag 1941, S. 21/32.
- [23] Wilke, W.: Untersuchungen am Hesselman-Motor — Autom.-techn. Z. Bd. 41 (1938) S. 25/30.
- [24] Wolfer, H. H.: Der Zündverzug im Dieselmotor — In: VDI-Forsch.-Heft 392 (Zündverzug und Klopfen im Motor), Berlin: VDI-Verlag 1938, S. 15/24.
- [25] Eine neue Kraftstoffversuchsanlage — Öl u. Kohle Bd. 14 (1938) S. 78/79.

001078

Zündverzugsmessungen an Diesel- und Ottokraftstoffen

Die heute angewendeten motorischen Prüfverfahren für Kraftstoffe befriedigen nicht völlig. Besonders dringend ist der Wunsch nach einem einheitlichen Prüfverfahren für Dieselloftstoffe. Aber auch nach Erfüllung dieses Wunsches im Sinne eines der heute angewendeten Verfahren brauchte man für Otto- und Dieselloftstoffe zwei verschiedene Prüfmotoren, mit denen entsprechend den verschiedenartigen Anforderungen der Otto- und Dieselmotoren einmal die Klopfestigkeit, das andere Mal die Zündwilligkeit des Kraftstoffes festgestellt werden muß. Eine bedeutende Vereinfachung wird es bedeuten, wenn man die für beide Motorenarten wichtigen Kraftstoffseigenschaften mit einer einzigen Kenngröße erfassen kann, die in nur einem Prüfmotor bestimmt zu werden braucht. Diese Möglichkeit ist nach den heutigen Erkenntnissen gegeben. Im Zuge der Arbeiten zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für alle Kraftstoffe werden nachstehend Prüfergebnisse von Diesel- und Ottokraftstoffen mitgeteilt, die nach dem Zündverzugs-Meßverfahren des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren an der Technischen Hochschule Stuttgart gewonnen wurden.

1 Aufgabenstellung

Die Bewertung der Kraftstoffe geschieht heute — je nach ihrer Verwendung im Otto- oder Dieselmotor — nach zwei verschiedenen Maßstäben. Der Ottomotor verlangt vom Kraftstoff möglichst geringe Klopfneigung, der Dieselmotor — in bestimmten Grenzen — geringen Zündverzug. Demzufolge wird bei Ottokraftstoffen das Klopfverhalten in einem Prüfmotor festgestellt und die Klopfestigkeit durch Vergleich mit einem Gemisch aus einem sehr klopfesten und einem zum Klopfen neigenden Kraftstoff Iso-Oktan und n-Heptan in Raumeinheiten des Anteils des klopfesten Kraftstoffes im Gemisch angegeben (Oktanzahl). Entsprechend wird der Zündverzug der Dieselloftstoffe gemessen und die Zündwilligkeit mit Hilfe eines Vergleichsgemisches aus Cetan und Alphamethylnaphthalin in Einheiten der Cetanzahl angegeben.

Nun besteht zwischen der Klopfestigkeit und Zündwilligkeit der Kraftstoffe, entsprechend also auch zwischen der Oktan- und der Cetanzahl, ein eindeutiger Zusammenhang [2, 7, 10¹⁾]. Je klopfester ein Kraftstoff ist, desto größer ist sein Zündverzug, und umgekehrt. Dieser Zusammenhang legt den Gedanken nahe, an die Stelle der bisherigen verschiedenen Prüfverfahren für Otto- und Dieselloftstoffe, die zudem nicht völlig befriedigen [1, 4], ein einheitliches Prüfverfahren zu setzen, indem man bei allen Kraftstoffen z. B. den Zündverzug mißt. Man kann dann entweder Dieselloftstoffe und Ottokraftstoffe einheitlich nach Cetanzahlen bewerten, wobei eine niedrige Cetanzahl einer hohen Klopfestigkeit entsprechen würde, oder bei Ottokraftstoffen die erhaltene Cetanzahl auf Grund der bekannten Beziehung in Einheiten der Oktanzahl umrechnen oder unmittelbar mit Hilfe der Zündverzugsmessung die Oktanzahl bestimmen.

Das Ziel der Arbeit ist, in Ergänzung motorischer Untersuchungen [3] die Grundlagen für die Einführung eines solchen einheitlichen Prüfverfahrens von der Kraftstoffseite zu klären.

Für die Durchführung der Zündverzugsmessungen stand das im Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS) entwickelte Zündverzugs-Meßverfahren [2] zur Verfügung. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurden Zündverzugsmessungen an verschiedenen Diesel- und Ottokraftstoffen durchgeführt²⁾.

2 Das FKFS-Zündverzugs-Prüfverfahren für Kraftstoffe

Das vom Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen entwickelte Zündverzugs-Prüfverfahren beruht auf der Messung des Kurbelwinkels in Grad, der zwischen dem Beginn der Einspritzung des Kraftstoffes und dem Beginn seiner Entflammung verstreicht. Der Einspritzpunkt wird mit einem elek-

¹⁾ Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Schrifttumverzeichnis auf Seite 32.

²⁾ Die Messungen wurden von Dipl.-Ing. S. Kofink durchgeführt.

trischen Kontakt, der Entflammungspunkt mit einer Photozelle durch ein Quarzfenster erfaßt und als Stromstoß einem Gerät zugeleitet, an dem der Zündverzug unmittelbar in Grad Kurbelwinkel abgelesen werden kann. Mit Hilfe einer Eichkurve, die den Zusammenhang zwischen dem Zündverzug und der Zusammensetzung der Eichgemische aus Cetan und Alphamethylnaphthalin angibt, kann die Zündwilligkeit des zu prüfenden Kraftstoffes in Einheiten der Cetanzahl ausgedrückt werden.

Die Untersuchungen wurden am FKFS-Prüfmotor mit unmittelbarer Einspritzung durchgeführt [5]. Der Prüfmotor ist mit einem elektrischen Anlaßmotor bzw. Bremsstromerzeuger unmittelbar gekuppelt. Die gesamte Versuchsanlage ist aus Bild 1 und 2 ersichtlich.

Die Betriebskennwerte des Motors sind:

Zylinderzahl	1;
Höchstzahl	$n = 2500$ U/min;
Bohrung	100 mm;
Hub	130 mm;
Hubraum	1040 cm ³ .

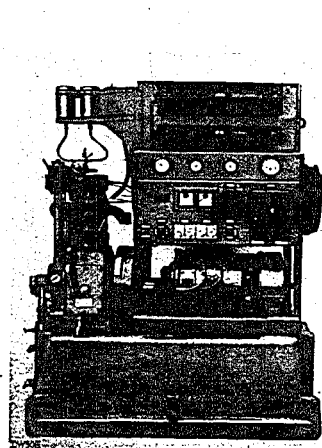


Bild 1. FKFS-Kraftstoffprüfstand.

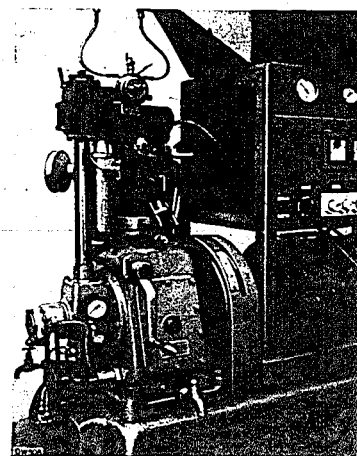


Bild 2. Teilansicht des Prüfstandes mit dem FKFS-Kraftstoffprüfmotor.

Bei der Kraftstoffprüfung wird folgender Betriebszustand eingehalten:

Motordrehzahl	$n = 1800$ U/min;
Voreinspritzwinkel	20° vor o. T.;
Verdichtungsverhältnis	$\epsilon = 13$ bzw. 16 bzw. 19
(während der Messung unverändert);	
Ansauglufttemperatur	45° C;
Kühlwassertemperatur	70° C;
Temperatur des Schmieröls	70° C;
Eingespritzte Kraftstoffmenge je Hub	35 mm ³ ;
Einspritzdruck	180 atü.

Das Verdichtungsverhältnis kann mit einer Handkurbel eingestellt und an einem Zähler abgelesen werden.

Da das Quarzfenster, durch das der Lichtstrahl von der Zündstelle auf die Photozelle fällt, nach längerer Versuchsdauer veruhen kann, ist es bei der Durchführung von Meßreihen notwendig, nach den einzelnen Meßabschnitten die Eichkurve der Cetanmischungen jeweils neu aufzunehmen. Die Versuchswerte des Kraftstoffes und die Cetaneichkurve werden dann durch die Veruhen annähernd in gleicher Weise beeinflusst, so daß die aus der Eichkurve gefundene Cetanzahl nur wenig von dem

wahren Wert abweicht. Bei Einzeluntersuchungen kann die Meßgenauigkeit unter entsprechendem Zeitaufwand wesentlich erhöht werden, indem der Versuchskraftstoff durch Eichgemische von eng beieinander liegenden Zündverzugswerten eingegrenzt wird.

3 Voruntersuchungen über den Einfluß der Verdichtung auf die Cetanzahl von Abadanmischungen

Bei Veränderung des Verdichtungsverhältnisses ändert sich bekanntlich der Zündverzug eines Kraftstoffes. Die Angabe der Zündwilligkeit in Einheiten der Cetanzahl ist aber nur dann eindeutig, wenn diese Änderung bei den verschiedenen Kraftstoffen nach dem gleichen Gesetz vor sich geht, d. h. wenn die Kraftstoffe von den veränderten Betriebsbedingungen in gleicher Weise beeinflusst werden. Sonst würde die Cetanzahl nur für das Verdichtungsverhältnis Geltung haben, bei dem die Vergleichsprüfung des Kraftstoffes mit dem Cetangemisch durchgeführt worden ist.

Der Einfluß des Verdichtungsverhältnisses auf die Cetanzahl wurde an Gemischen von Abadan und S 300 untersucht, wobei die Anteile der Gemische zwischen 0 und 100 Vol.-% jeweils von 10 zu

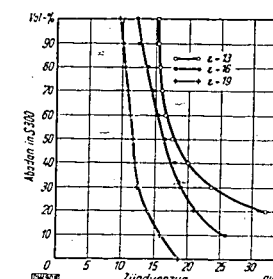
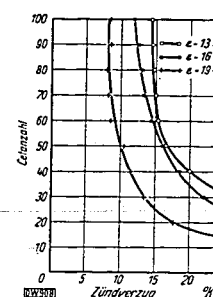


Bild 3 und 4. Zündverzugskurven von Gemischen aus Cetan und Alphamethylnaphthalin (Bild 3) sowie aus Abadan und S 300 (Bild 4) bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ϵ .

10 Vol.-% geändert wurden. Die Kraftstoffe Abadan und S 300 weichen in ihrem Aufbau und ihren Eigenschaften ähnlich voneinander ab, wie Cetan und Alphamethylnaphthalin, sind aber wesentlich billiger.

Die bei drei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen — nämlich 13, 16 und 19 — gemessenen Zündverzugswerte ergaben stetige Kurven von hyperbolischem Verlauf, Bild 3 und 4.

Dieses Ergebnis ermöglicht den Ausgleich von Meßungenauigkeiten. Einzelwerte, die ein wenig vom hyperbolischen Verlauf abweichen, können danach mit hoher Wahrscheinlichkeit in Richtung dieses Verlaufs berichtigt werden, vorausgesetzt, daß dieser selbst durch andere Meßwerte genügend gestützt ist. Bei den folgenden Messungen, für die die gemachte Voraussetzung zutrifft, wurde in dieser Weise verfahren.

Zur Prüfung des Einflusses, den das Verdichtungsverhältnis auf die Cetanzahl ausübt, wurden die Messungen jeweils zweimal durchgeführt, und zwar bei den Verdichtungsverhältnissen $\epsilon = 13$, 16 und 19. Die gemessenen Werte wurden in der beschriebenen Weise berichtigt und miteinander in Beziehung gesetzt; d. h. der Zündverzug der Abadanmische wurde in Cetanzahlen ausgedrückt.

Für alle drei Verdichtungen ergaben die Messungen, abgesehen von geringen Streuungen, annähernd dieselben Werte, Bild 5.

Hiermit war erwiesen, daß bei Abadanmischungen die Verdichtung auf die Cetanzahl keinen oder nur einen unwesentlichen Einfluß ausübt. Demnach ist es gleichgültig, bei welcher Verdichtung Abadanmische im Versuchsmotor geprüft werden. Während der Prüfung muß natürlich das Verdichtungsverhältnis gleich gehalten werden. Durch Aufzeichnen der Mittelwerte aus Bild 5 erhält man eine Gerade (Bild 6). Entsprechend der Cetanzahl kann der Gehalt an Abadan im Gemisch als Abadanzahl bezeichnet werden.

Dieses Ergebnis erlaubt, an Stelle der teuren Eichmischungen aus Cetan und Alphamethylnaphthalin, Abadan und S 300 als Eichkraftstoffe zu verwenden, da ihre gegenseitige Beziehung aus der Kurve abgelesen werden kann.

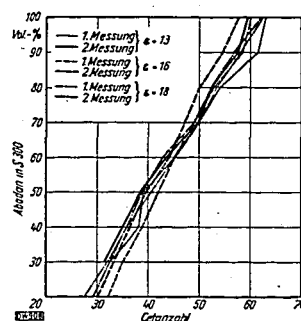


Bild 5. Cetanzahlen von Gemischen aus Abadan und S 300 bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ϵ .

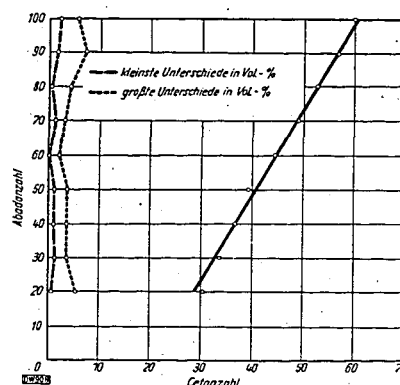


Bild 6. Zusammenhang zwischen Cetanzahl und Abadananzahl.
Die gestrichelten Kurven beziehen sich auf Bild 5.

4 Ergebnisse mit Dieselmotoren verschiedener Zusammensetzung

Die neuen Erkenntnisse für die Prüfung von Dieselmotoren am FKFS-Prüfmotor wurden an 18 Kraftstoffen verschiedener Zusammensetzung und von zwei verschiedenen Herstellern stammend in zwei Meßreihen erprobt. Die Untersuchungen wurden bei verschiedenen Verdichtungen vorgenommen, so daß auch die schlecht zündenden Kraftstoffe bei Wahl eines entsprechend hohen Verdichtungsverhältnisses geprüft werden konnten. Um die Kraftstoffe für jede Meßreihe nach ihrer Zündwilligkeit richtig einstufen zu können, mußten ihre Zündverzugswerte zuvor in Vorversuchen annähernd ermittelt werden. Jede Meßreihe wurde zweimal durchgeführt, wobei eine Vergleichsübersicht über die Meßgenauigkeit zwischen den einzelnen Versuchswerten nur kleine Unterschiede von 1 bis 2 Einheiten der Cetanzahl ergab.

Bei einem Teil der Kraftstoffe verußte das Quarzfenster stark, so daß die Versuchsreihe möglichst rasch durchgeführt werden mußte. Auch bei diesen Messungen erwies es sich als unbedingt erforderlich, den Zündverzug der Cetan-Eichmischungen möglichst oft im Rahmen einer Meßreihe zu bestimmen, da dieser sich bei gleicher Verdichtung durch die Verußung des Quarzfensters ändert.

5 Zündverzugsmessung an schlecht zündenden Kraftstoffen

51 Kühlung der Einspritzanlage

Da die schlecht zündenden Kraftstoffe hohen Dampfdruck und demzufolge niedrige Verdampfungstemperatur aufweisen, ließ sich die Kraftstoffeinspritzung mit der üblichen Bosch-Einspritz-Anordnung ohne besondere Maßnahme nicht bewerkstelligen. An sich müßte zwar bei dem hohen Einspritzdruck von 180 atü der Kraftstoff flüssig bleiben, doch während des Ansaughubes der Einspritzpumpe entsteht zwischen Einspritzkolben und Rückschlagventil im Pumpenhals ein Unterdruck, wodurch der Kraftstoff sich entspannen und verdampfen kann. Das so entstehende Dampfpolster unterbricht den Kraftstoffzufluß.

Um leicht verdampfbare Ottokraftstoffe mit der üblichen Einspritzpumpe einspritzen zu können, mußte die Einspritzanlage deshalb zunächst gekühlt werden. Zu diesem Zweck wurde um die Einspritzpumpe ein Behälter angebracht, der mit Kohlenäureschnee gefüllt war, so daß die Einspritzpumpe vollkommen vom Kühlmittel umgeben war (Bild 7). Außerdem war die Einspritzleitung von einer Kühltülle umgeben, die in Asbestbrei gebettet war. Das Kühlmittel in der Kühltülle bestand aus Eis und Salzwasser und hatte eine Temperatur von etwa -11°C . Für den Umlauf des

Eiswassers sorgte eine Kühlwasserpumpe, die am Tachometerantrieb mit dem Prüfmotor gekuppelt wurde.

Der erste Versuch mit dieser Kühlanlage ergab, daß Leichtkraftstoffe nunmehr ohne weiteres mit der Bosch-Pumpe eingespritzt werden können. Darauf wurde die Eiswasserkühlung versuchsweise ausgeschaltet, so daß nur die Kohlenäureschneekühlung wirkte. Trotzdem arbeitete bei den meisten Kraftstoffen die Einspritzpumpe einwandfrei. Auf Grund dieser Erkenntnis wurden die weiteren Versuche mit Ottokraftstoffen nur noch mit der Kohlenäureschneekühlung an der Pumpe durchgeführt.

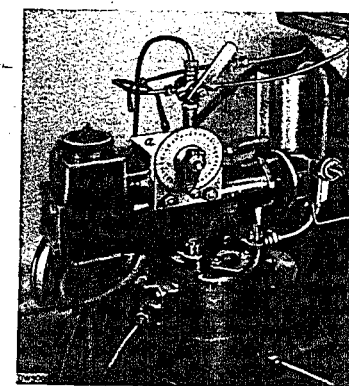


Bild 7. Kühlanlage an der Einspritzpumpe.
a) Behälter mit Kohlenäureschnee, der die Einspritzpumpe umschließt.

52 Zündverzugsmessungen an Benzin-Benzol- und an Iso-Oktan-Heptan-Gemischen

Die gleichen Untersuchungen wie mit Abadan und S 300 wurden nun mit den Bezugskraftstoffen I. G.-Eichbenzin und Reinbenzol durchgeführt. Hierdurch sollte einerseits wieder bewiesen werden, daß die Verdichtung auf die Cetanzahl keinen Einfluß hat, andererseits der Zusammenhang der Gemische Reinbenzol und I. G.-Eichbenzin zu Cetan und Alphamethylnaphthalin festgestellt werden.

Die Messungen wurden wieder je zweimal bei den Verdichtungsverhältnissen $\epsilon = 16$ und 18 vorgenommen (Bild 8 bis 11). Auch hier war es unbedingt erforderlich, mit dem zu prüfenden Kraftstoff immer den entsprechenden Eichkraftstoff mit der bekannten Cetanzahl zu messen, und zwar in der Meßreihe zeitlich sofort nacheinander. Durch Nichtberücksichtigen dieser Notwendigkeit bei den ersten Messungen wurden die Ergebnisse so stark beeinträchtigt, daß die Messungen wiederholt werden mußten.

Weitere Zündverzugsmessungen wurden an Gemischen aus Isooktan und Normalheptan wieder bei zwei verschiedenen Verdichtungen vorgenommen, Bild 12 bis 15.

Wegen der stärkeren Verußung des Quarzfensters, die insbesondere die Eichgemische mit hohem Cetangehalt bei hoher Verdichtung ($\epsilon = 18$) hervorriefen, wurde eine Versuchsreihe von elf Gemischen in zwei Gruppen eingeteilt mit jeweiligem Wechsel des Quarzfensters. Die zweite Meßreihe bei dem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 18$ wurde ohne Quarzfensterwechsel durchgeführt. Es zeigte sich, daß die Verußung, die durch die Cetanmischungen hervorgerufen wird, durch die Heptan- und Isooktanmischungen wieder etwas vermindert wird, so daß in der Kurve ein Knick entstehen kann. Diese Fehlermöglichkeit wird durch Zerteilung der Versuchsreihen — wie sie auch für das niedrigere Verdichtungsverhältnis vorgenommen wurde — eingeschränkt, Bild 13.

53 Zusammenhang zwischen Oktan- und Cetanzahl

Durch die Messung der Zündverzugswerte der Gemische aus Isooktan und Normalheptan sowie aus Cetan und Alphamethylnaphthalin konnte das Verhältnis zwischen Oktanzahl und Cetanzahl

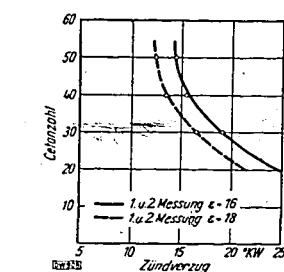


Bild 8 (links). Cetan-Eichkurven zu den Messungen des Bildes 9 für zwei Verdichtungsverhältnisse ϵ .

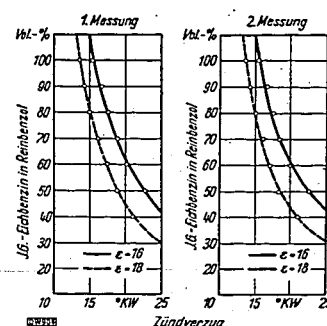


Bild 9 (links). Zündverzögerungskurven von Gemischen aus I. G.-Eichbenzin und Reibenzol für zwei Verdichtungsverhältnisse ϵ .

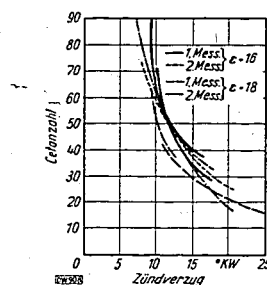


Bild 10 (links). Gemessene Werte. Die Unterbrechungen bei einem Teil der Kurven sind durch Ausbau und Reinigen des Quarzfensters bedingt.

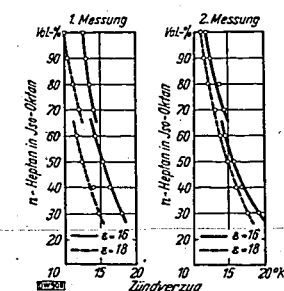


Bild 11 (links). Mittelwert-Linie. Bild 10 und 11. Zusammenhang zwischen den Anteilen an Reibenzol in Reibenzol-Eichbenzin-Gemischen und der Cetanzahl.

Bild 12 (links). Cetan-Eichkurven zu den Messungen des Bildes 13 für zwei Verdichtungsverhältnisse ϵ . Die Unterbrechungen bei einem Teil der Kurven sind durch Ausbau und Reinigen des Quarzfensters bedingt.

Bild 13 (links). Zündverzögerungskurven von Gemischen aus n-Heptan und Iso-Oktan für zwei Verdichtungsverhältnisse ϵ .

Bild 14 (links). Gemessene Werte. Bild 14 und 15. Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 15 (links). Mittelwert-Linie. Bild 14 und 15. Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 16 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 17 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 18 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 19 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 20 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 21 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 22 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 23 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 24 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 25 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 26 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 27 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 28 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 29 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 30 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 31 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 32 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 33 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 34 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 35 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 36 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 37 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 38 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 39 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 40 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 41 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 42 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 43 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 44 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 45 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 46 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 47 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 48 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 49 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 50 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 51 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 52 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 53 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 54 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 55 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 56 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 57 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 58 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 59 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 60 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 61 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 62 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 63 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 64 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 65 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 66 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 67 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 68 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 69 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 70 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 71 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 72 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 73 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 74 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 75 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 76 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 77 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 78 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 79 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 80 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 81 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 82 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 83 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 84 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 85 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 86 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 87 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 88 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 89 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 90 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 91 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 92 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 93 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 94 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 95 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 96 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 97 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 98 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 99 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

Bild 100 (links). Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

aufgestellt werden. Es ergab sich ein linearer Zusammenhang, Bild 15. Auf diese Weise ist es möglich, durch die Bestimmung des Zündverzugs unmittelbar auf die Klopfestigkeit des Kraftstoffes zu schließen.

Bis vor kurzem wurde an Stelle von Cetan das nicht so beständige Ceten verwendet. Der Zusammenhang von Cetanzahl und Oktanzahl ist aus Bild 16 zu ersehen.

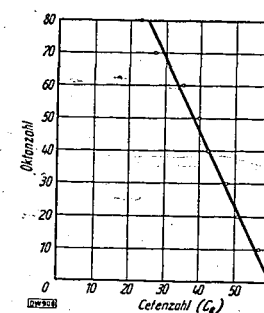


Bild 16. Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl.

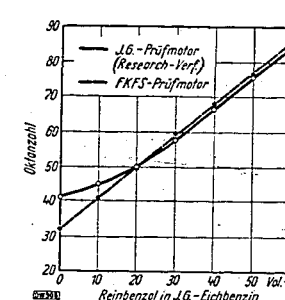


Bild 17. Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Cetanzahl. Die Unterbrechungen bei einem Teil der Kurven sind durch Ausbau und Reinigen des Quarzfensters bedingt.

Auf Grund der Ergebnisse von Isooktan + Normalheptan und Reibenzol + I. G.-Eichbenzin wurde eine Verhältniskurve von Isooktan zu Reibenzol aufgestellt, Bild 17, die sich ebenfalls als Gerade herausstellte. Die Nachprüfung einzelner herausgegriffener Punkte der Geraden durch Zündverzögerungsmessungen bestätigte ihre Richtigkeit. Außerdem war hier eine weitere Nachprüfung möglich, weil vom I. G.-Prüfmotor eine entsprechende Kurve vorhanden war [9]. Diese Kurve ist ebenfalls in Bild 17 eingezeichnet. Man sieht, daß die beiden Kurven im oberen Bereich der Oktanzahl (50 bis 100) fast übereinstimmen. Die Unterschiede liegen hier innerhalb der Meßfehlergrenzen. Weiter unten biegt die Kurve vom I. G.-Motor ziemlich stark nach oben ab [6, 8].

Die starke Ähnlichkeit und teilweise sogar Übereinstimmung der beiden Versuchskurven in Bild 17 beweist, daß die Meßergebnisse in der richtigen Größenordnung liegen und der Zündverzug in gesetzmäßigem Zusammenhang mit der Klopfestigkeit von Kraftstoffen steht.

54 Einfluß von Zusätzen

An I. G.-Eichbenzin und Leunabenzin wurde nunmehr der Einfluß von Zusätzen, wie Bleitetraäthyl sowie verschiedene Alkoholararten, geprüft. Beispielsweise wurden zu I. G.-Eichbenzin 0,2 bzw. 0,3, 0,6, 0,8, 1,0 und 1,5 cm³/l Äthylfluid (mit rd. 65 Gew.-% Bleitetraäthyl) zugegeben und von den so verbleiten Kraftstoffen die Cetanzahl bestimmt. Der Bleitetraäthylzusatz bewirkt hier, wie zu erwarten, eine Abnahme der Cetanzahl, und zwar von 41 auf 25 bei einer Verbleitung von 1,5 cm³/l, Bild 18. Bei Leunabenzin nahm die Cetanzahl von 33,5 auf 24,5 ab.

Der Einfluß von vier Alkoholararten (Äthyl-, Propyl-, Butyl- und Amylalkohol) wurde am I. G.-Eichbenzin erprobt, wobei Zusätze von 10 bis 20 % beigemischt wurden. Der Alkoholzusatz bewirkt gleichfalls durchweg eine Abnahme der Cetanzahl, und zwar macht sich der Einfluß mit zunehmender Kettenlänge der Alkohole weniger bemerkbar, Bild 19. Das Quarzfenster verunreinigte bei der Messung von I. G.-Eichbenzin mit Alkoholzusätzen fast gar nicht, und zwar am wenigsten mit Amylalkoholzusatz.

Während Bleitetraäthyl und die Alkohole als Zusatzstoffe bekannt sind, die die Klopfestigkeit eines Kraftstoffes erhöhen, also die Zündwilligkeit herabsetzen, wird Äthylinitrat bei Dieselmotoren zum Erhöhen der Zündwilligkeit verwendet. Die Wirkung dieses Stoffes sollte zunächst an den Grundkohlenwasserstoffen Hexan, Heptan, Oktan und Nonan festgestellt werden.

Zahlentafel 1.

Cetanzahlen von Hexan, Heptan, Oktan und Nonan

Kraftstoff	Zündverzug °KW	Cetanzahl
Cetan-Eichgemisch 50	9,6 bis 9,7	50
Heptan	14,8 bis 15,0	33
Oktan	12,4 bis 12,6	38
Nonan	11,8 bis 12,0	40
Cetan-Eichgemisch 40	16,5 bis 16,8	24,5
Hexan	17,4 bis 17,5	30

Zahlentafel 2.

Einfluß von 3% Äthylnitratzusatz auf die Cetanzahl von Heptan, Hexan, Oktan und Nonan

Kraftstoff	Zündverzug °KW	Cetanzahl
Cetan-Eichgemisch 60	11,0 bis 11,1	60,0
Heptan + 3% Zusatz	11,0 bis 11,2	60,0
Nonan + 3% Zusatz	11,8 bis 12,2	54,0
Cetan-Eichgemisch 50	12,6 bis 12,8	50,0
Oktan + 3% Zusatz	12,6 bis 13,0	49,0
Hexan + 3% Zusatz	14,2 bis 14,6	39,0
Cetan-Eichgemisch 40	13,8 bis 14,2	40,0

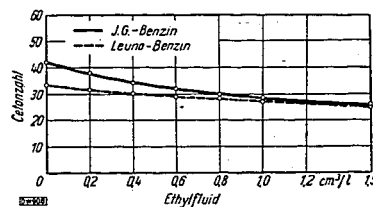


Bild 18. Einfluß von Ethylfluid (mit rd. 65 Gew.-% Bleitetraäthyl) auf die Cetanzahl von I.G.-Eichbenzin und von Leuna-Benzin.

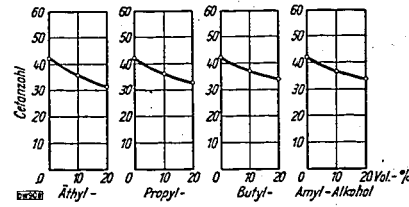


Bild 19. Einfluß von Alkoholzusätzen auf die Cetanzahl von I.G.-Eichbenzin.

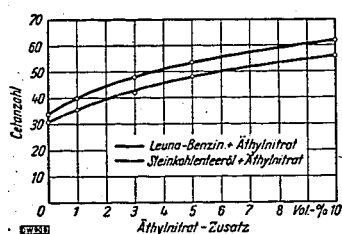


Bild 20. Einfluß von Äthylnitrat auf die Cetanzahl von Leuna-Benzin und Steinkohlenteeröl.

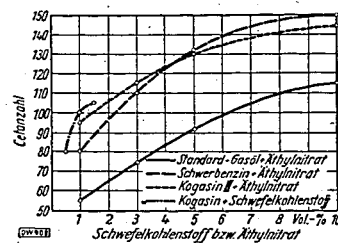


Bild 21. Einfluß von Äthylnitrat sowie von Schwefelkohlenstoff auf die Cetanzahl von Kraftstoffen.

Die unter Anwendung der oben beschriebenen Kühlvorrichtung ermittelten Cetanzahlen dieser Stoffe nahmen mit Ausnahme von Heptan mit der Länge der Kette zu und liegen zwischen 25 und 50 (Zahlentafel 1). Hierbei muß allerdings erwähnt werden, daß es sich bei Hexan, Oktan und Nonan um gewerbliche Erzeugnisse, bei Heptan dagegen um den reinen Stoff handelt. Nach Zahlentafel 2 wird die Cetanzahl dieser Grundkohlenwasserstoffe durch den Zusatz von 3% Äthylnitrat wesentlich erhöht.

Der Einfluß von Äthylnitrat wurde ferner an den Kraftstoffen Leunabenzin, Steinkohlenteeröl (Bild 20), Standardgasöl, Schwerbenzin und Kogasin II (Bild 21), untersucht. Es wurden 1 bis 10% Äthylnitrat zugesetzt und die Cetanzahl der Mischungen bestimmt. Auch hier ergab sich ein mehr oder minder starkes Ansteigen der Cetanzahl. Mit steigender Zusatzmenge wird der Kurvenverlauf flacher, d. h. die Cetanwerte nähern sich asymptotisch einem Bestwert.

An Kogasin wurde außerdem noch der Einfluß von Schwefelkohlenstoff geprüft. Die Zündverzugs-messung ergab eine Erhöhung der Cetanzahl von 80 auf 105 bei einer Steigerung des Schwefelkohlenstoffgehaltes von 0,5 auf 1,5 Vol.-% (Bild 21). Hier tritt allmählich eine Sättigung ein, so daß eine weitere Steigerung der Cetanzahl nur durch Zugabe von übermäßig viel Schwefelkohlenstoff erreicht werden könnte.

55 Ergebnisse mit handelsüblichen Ottokraftstoffen verschiedener Zusammensetzung

Schließlich wurde noch eine Reihe von handelsüblichen Ottokraftstoffen verschiedener Zusammensetzung nach dem FKFS-Verfahren geprüft und die Ergebnisse mit den an einem I. G.-Prüfmotor festgestellten Werten verglichen. Hierbei wurde bei den zu untersuchenden Kraftstoffen der Zündverzug gemessen, durch Vergleich mit dem entsprechenden Eichgemisch die Cetanzahl ermittelt und dann mit Hilfe der Cetan-Oktan-Kurve die Oktanzahl bestimmt. Es ergab sich annähernd eine Übereinstimmung mit den nach dem I. G.-Verfahren erhaltenen Oktanwerten, Zahlentafel 3.

Zahlentafel 3. Beurteilung von Ottokraftstoffen der Arbeitsgemeinschaft für Kraftfahrwesen nach dem FKFS-Verfahren und dem I. G.-Verfahren hinsichtlich der Oktanzahl

Kraftstoff	Messung am FKFS-Motor				Oktanzahl I. G.-Prüf- motor	Unterschied in Einheiten der Oktanzahl
	gemessener Zündverzug °KW	Zündverzug- Mittelwert °KW	Cetanzahl	Oktanzahl		
Cetan-Eichgemisch 30	17,4 bis 17,6	17,5	—	—	—	—
V 7	18,9 bis 19,1	19,0	25,5	78,0	74,0	+ 4
Cetan-Eichgemisch 20	21,6 bis 21,8	21,7	—	—	—	—
V 53	18,2 bis 18,3	18,25	27,5	71,0	75,4	- 4,4
Cetan-Eichgemisch 30	17,4 bis 17,5	17,45	—	—	—	—
V 20	20,2 bis 20,4	20,3	22,5	87,5	91,1	- 3,6
V 40	22,5 bis 23,0	22,7	18,5	98,5	94,0	+ 4,5
Cetan-Eichgemisch 20	21,8 bis 22,0	21,9	—	—	—	—

Für die Oktanzahlbestimmung von leicht verdampfenden Kraftstoffen nach dem FKFS-Verfahren muß die zugehörige Cetanzahl mit möglichst großer Genauigkeit ermittelt werden, da bei dem steilen Verlauf der Oktan-Cetan-Geraden (Bild 15) einem geringen Fehler in der Cetanzahl-Bestimmung ein wesentlich größerer Fehler in der Oktanzahl entspricht. Dieser Nachteil entfällt, wenn man unmittelbar mit dem Vergleichskraftstoff Isooktan-n-Heptan oder einem entsprechenden Zwischen-Eichbenzin eicht.

6 Verbesserung der Prüfeinrichtungen für das FKFS-Verfahren

61 Kraftstoffbehälteranordnung

Das häufige Aufgießen sowie Ablassen von Kraftstoffen erscheint bei der Prüfung sehr umständlich. Um diese Unannehmlichkeit zu beseitigen, wurden anstatt zweier Behälter — einer für den zu untersuchenden Kraftstoff, der andere für das Eichgemisch — sechs Hochbehälter angeordnet, Bild 22. Davon werden zwei kleinere Behälter — einer dieser Behälter ist in Bild 22 verdeckt — für den zu prüfenden Kraftstoff benötigt und vier größere für die jeweiligen Eichgemische verschiedener Zusammensetzung, wobei entweder Cetan-Alphamethylnaphthalin- oder Abadan-S 300-Mischungen benutzt werden können. Die Zusammensetzungen der Eichgemische werden so gewählt, daß der Verlauf der Eichkurve festgelegt werden kann. Ein am Motor angebrachter Sechsweghahn gestattet eine schnelle Umschaltung von einem auf den anderen Kraftstoff.

62 Meßglaseinrichtung

Zur genaueren Kontrolle wurden die Behälter für den zu prüfenden Kraftstoff als Meßglasbehälter ausgebildet, Bild 22. Sie enthalten jeweils die notwendige Kraftstoffmenge für eine Messung. Jeder Meßbehälter ist mit einem Schauglas versehen. Dadurch kann man feststellen, wann der Motor mit dem Versuchskraftstoff in Betrieb kommt, d. h. wann mit der Zündverzugs-messung begonnen werden kann, ferner wann wieder auf den Zwischenkraftstoff umgeschaltet werden muß.

63 Selbstreinigung des Quarzfensters

Beim Prüfen von I. G.-Eichbenzin mit Alkoholzusätzen hatte sich gezeigt, daß bei einem Zusatz von Amyl-Alkohol das Quarzfenster nur wenig verrußte. Um die Möglichkeit einer Selbstreinigung des Quarzfensters im Anschluß an die jeweilige Messung zu prüfen, wurde daher ein Versuch mit einer Mischung aus 50% Kogasin II und 50% Amyl-Alkohol durchgeführt. Dabei ergab sich, daß beim Verbrennen dieses Gemisches ein verrußtes Quarzfenster sich zwar etwas reinigte, aber nicht ausreichend, um weitere Zündverzugs-messungen zu ermöglichen. Das Verbrennen des Alkoholgemisches hemmte im wesentlichen lediglich die weitere Rußbildung.

Nun wurden weitere Versuche mit Nitrobenzol- und Peroxydzusätzen vorgenommen, aber auch diese führten nicht zum Ziel. Der in diesen Stoffen chemisch gebundene Sauerstoff wird zwar während der Verbrennung frei, die Menge ist aber zu klein, um ein vollständiges Abbrennen der Rußteilchen herbeizuführen.

Da die Versuche zur Selbstreinigung des Quarzfensters durch Zusatz von Oxydationsmitteln zu Kogasin II somit nicht befriedigen, ließ man den Motor Sauerstoff aus einem in den Ansaugstutzen eingeführten Röhren in den Verbrennungsraum ansaugen. Die angesaugte Sauerstoffmenge betrug etwa 6 l/min bei einem Eintrittsdruck in den Ansaugstutzen von 2 atü. Durch Verbrennen des Kraftstoffes in der auf diese Weise mit Sauerstoff angereicherten Luft war es möglich, das Quarzfenster innerhalb 3 bis 5 min so zu reinigen, daß das Meßgerät den Zündverzug wieder einwandfrei anzeigte. Sofern das Quarzfenster nicht schon vorher zu sehr aufgeraut und eingebrannt ist, braucht keine mechanische Reinigung mehr vorgenommen zu werden. Auf diese Weise bleibt das Ausbauen des Quarzfensters erspart.

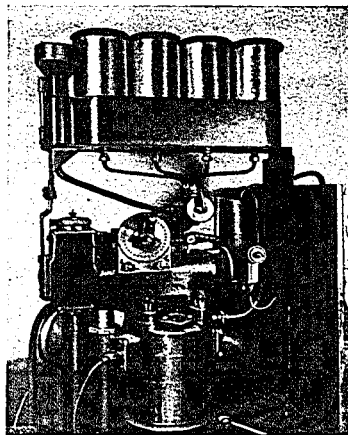


Bild 22. Kraftstoffbehälter-Anordnung mit Verteiler und Meßglas am FKFS-Prüfmotor.

64 Kraftstoffzubringerpumpe

Bei der Prüfung von Ottokraftstoffen wurde bisher die Einspritzpumpe mit Kohlensäureschnee gekühlt, um Dampfblasenbildung auf der Saugseite der Einspritzpumpe zu vermeiden. Da dies aber nicht bei allen Kraftstoffen gelang, wurde in die Kraftstoffleitung vor der Einspritzpumpe eine Benzin-Zubringer-Pumpe eingebaut. Auf diese Weise wurde die Möglichkeit einer Unterdruckbildung ausgeschaltet. Die Ottokraftstoffe konnten daraufhin bei weggelassener Kühlung ohne Störung eingespritzt werden, und die Zündverzugsmessungen lieferten gut wiederholbare Ergebnisse.

7 Genauigkeit des FKFS-Verfahrens

Am FKFS-Prüfmotor sollten ursprünglich nur Dieseldieselkraftstoffe nach dem Zündverzugs-Meßverfahren untersucht werden. Erst als die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kohlenwasserstoffen geklärt werden sollten, wurden auch Ottokraftstoffe nach dem Zündverzugsverfahren untersucht.

Die seitherige Prüfung von Kraftstoffen am FKFS-Prüfmotor ergab immerhin einen Fehler in den Grenzen von ± 2 Einheiten der Cetanzahl. Dieser Fehler konnte dadurch verkleinert werden, daß an Stelle der Aufnahme der Zündverzugs-eichkurven durch allmähliche Eingrenzung die Eichmischung hergestellt wurde, die denselben Zündverzug aufwies wie der zu untersuchende Kraftstoff. Nach diesem Verfahren kann die Zündwilligkeit eines Kraftstoffes mit einer Genauigkeit von 1 Einheit der Cetanzahl angegeben werden.

Bei dieser Prüfungsweise wurde die Feststellung gemacht, daß bei manchen Kraftstoffen das Verdichtungsverhältnis einen Einfluß auf die Cetanzahl hat. Das trifft besonders für synthetische Kraftstoffe und solche Kraftstoffe zu, die mit irgendeinem Zusatzmittel versehen sind. Zahlentafel 4 zeigt, daß das Leunabenzin einen Unterschied von 2 bis 3 Einheiten und das Schieferöl von 3,5 Einheiten der Cetanzahl bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen aufweist [3].

Die mit Hilfe des Kurvenblatts (Bild 15) angegebenen Oktanzahlen weisen sogar Unterschiede von 8 bis 10 Einheiten auf. Diese großen Unterschiede sind wohl teilweise auf den steilen Verlauf der Verhältnisgeraden zurückzuführen. Die genaue Oktanzahl bekommt man durch unmittelbaren Vergleich mit Isooktan und n-Heptan oder deren Unterbezugskraftstoffen. Die Dieseldieselkraftstoffe Nr. 1 und 2 dagegen ergeben bei jedem Verdichtungsverhältnis etwa die gleiche Cetanzahl.

Zahlentafel 4. Einfluß des Verdichtungsverhältnisses auf die Cetan- bzw. Oktanzahl einiger Kraftstoffe

Kraftstoff-Bezeichnung	Verdichtungsverhältnis ϵ	Cetanzahl	Oktanzahl aus Kurvenblatt (Bild 15)	Oktanzahl unmittelbar bestimmbar
Leuna-Benzin	20,2	26,5	75,5	72,0
	17,3	28,5	69,0	69,0
	15,1	25,5	77,0	71,0
Schieferöl	16,2	46,0	16,0	
	13,9	43,5	22,5	
	11,8	42,5	26,0	
Dieseldieselkraftstoff Nr. 1 .	15,8	62,0	AA 0	
	13,0	63,0	AA 0	
	11,8	62,5	AA 0	
Dieseldieselkraftstoff Nr. 2 .	15,8	50,0	3	
	13,0	50,5	2	
	11,8	51,0	0	

Das FKFS-Zündverzugsverfahren kann bei der Prüfung von Kraftstoffen in zweierlei Weise zur Anwendung gelangen:

1. zur Reihenbestimmung von Kraftstoffen,
2. zur Einzelbestimmung von Kraftstoffen (Schiedsanalysen).

Das erste Verfahren wird dann angewendet, wenn eine ganze Reihe von Kraftstoffen untersucht werden soll und wenn eine Genauigkeit von ± 2 Einheiten der Cetanzahl ausreicht. Dabei wird so vorgegangen, daß mit etwa vier Eichmischungen verschiedener Zusammensetzung die Eichkurve aufgenommen wird, wobei zwischendurch immer wieder der Zündverzug der zu untersuchenden Kraftstoffe gemessen wird. Aus der Eichkurve kann dann die jeweilige Cetanzahl abgelesen werden.

Bei Untersuchungen, bei denen es darauf ankommt die Cetanzahl sehr genau zu ermitteln (Schiedsanalysen), ist es notwendig, den zu untersuchenden Kraftstoff unmittelbar mit bekannten Eichmischungen zu vergleichen.

Der zu untersuchende Kraftstoff wird dabei bei dem Verdichtungsverhältnis untersucht, bei dem sich ein Zündverzug von 16 bis 18° KW ergibt. Der Zündverzug des zu untersuchenden Kraftstoffes in Kurbelwinkelgraden ist am Meßgerät abzulesen, wobei besonders darauf zu achten ist, daß während der Messung keine Schwankungen auftreten. Sodann werden die Vergleichsmischungen aus Cetan und Alphamethylnaphthalin durch Ändern ihrer Zusammensetzung in ihrer Zündwilligkeit nach und nach so weit eingegrenzt, daß nur noch geringe Unterschiede im Zündverzug zwischen dem zu untersuchenden Kraftstoff und den Eichmischungen bestehen. Nach zwei Vergleichsmischungen, deren Zündverzugs sehr nahe oberhalb und unterhalb des Zündverzugs des zu untersuchenden Kraftstoffes liegen, wird durch Interpolation die Cetanzahl des zu untersuchenden Kraftstoffes mit einer Genauigkeit von 1 Einheit der Cetanzahl beurteilt.

Die Oktanzahl wird entweder aus einer Kurve, welche die Abhängigkeit von Cetanzahl und Oktanzahl darstellt, abgelesen, oder der Prüfkraftstoff wird unmittelbar mit Gemischen aus Iso-Oktan und n-Heptan verglichen. Das zweite Verfahren ist mit einer wesentlich größeren Genauigkeit verbunden.

8 Zusammenfassung

Wie die durchgeführten Untersuchungen zeigen, ist mit dem FKFS-Zündverzugs-Prüfverfahren grundsätzlich die Möglichkeit gegeben, in kurzer Zeit sowohl Diesel-, als auch Ottokraftstoffe an einem

001084

Prüfmotor auf ihren Zündverzug zu prüfen und daraus durch Vergleich mit den Bezugskraftstoffen die Cetanzahl der Kraftstoffe zu bestimmen.

Die Ottokraftstoffe werden hierbei in gleicher Weise wie die Diesellokraftstoffe in den Brennraum eingespritzt, wobei Dampfblasenbildung durch eine Kühlanordnung oder neuerdings eine Benzin-Zubringerpumpe am Motor verhindert wird. Eine einfache Beziehung zwischen Oktanzahl und Cetanzahl, die für den FKFS-Prüfmotor aufgestellt wurde, ermöglicht, zu jeder Cetanzahl sofort die Oktanzahl zu ermitteln. Eine größere Genauigkeit bei der Oktanzahl-Bestimmung wird dadurch erreicht, daß der Prüfkraftstoff unmittelbar mit Gemischen aus Iso-Oktan und n-Heptan verglichen wird.

Das FKFS-Prüfverfahren kommt gegenüber den bisherigen Prüfverfahren mit einem Prüfmotor für alle Kraftstoffe aus und gestattet eine schnellere Bestimmung ihrer Zündwilligkeit oder Klopf-festigkeit.

Das Verrußen des Quarzfensters im Prüfmotor kann nach den neuesten Erkenntnissen während eines kurzen Reinigungslaufes durch Anreichern der Ansaugluft mit Sauerstoff wieder rückgängig gemacht werden. Ein Auswechseln des Quarzfensters ist zudem äußerst einfach und in wenigen Augen-blicken durchzuführen.

An der Vervollkommnung des Verfahrens wird noch weiter gearbeitet.

Für Diesellokraftstoffe ist das Verfahren aber schon jetzt ausreichend erprobt, so daß es allgemein angewendet werden kann. Für Ottokraftstoffe hat die bisherige Erprobung keine grundsätzlichen Schwierigkeiten gezeigt, so daß es an der Zeit ist, eine Erprobung auf breiterer Grundlage vorzunehmen.

9 Schrifttumsverzeichnis

- [1] Dehn, K. und H. H. Berg: Hilfsmittel zur Prüfung der Klopfestigkeit von Motor und Kraftstoff — Motortechn. Z. Bd. 2 (1940) S. 289/93.
- [2] Ernst, H.: Über die Prüfung von Diesellokraftstoffen — Autom.-techn. Z. Bd. 42 (1939) S. 213/21.
- [3] Ernst, H.: Zündverzug und Bewertung des Kraftstoffes. Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für Diesel- und Ottokraftstoffe — In: Dtsch. Kraftf.-Forsch. H. 63 (vorliegendes Heft), Berlin: VDI-Verlag 1941, S. 1/20.
- [4] Lindner, W.: Grundlagen der Prüfung und Bewertung der flüssigen Kraftstoffe — Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 25/32; auch in: Motor und Kraftstoff, Berichtsheft der Wissenschaftlichen Herbsttagung 1938 des VDI in Augsburg, Berlin: VDI-Verlag 1939, S. 2/10 (mit Aussprachebeiträgen).
- [5] Maier, K.: Versuchseinrichtungen des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen an der Technischen Hochschule Stuttgart — Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 609/13.
- [6] Schütz, R.: Messung der Klopfestigkeit an Ottomotoren — Dtsch. Kraftf.-Forsch. H. 31, Berlin: VDI-Verlag 1939.
- [7] Wilke, W.: Untersuchungen am Hesselman-Motor — Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 778/80 (Bild 12).
- [8] Wilke, W.: Prüfmotoren zur Klopfwertbestimmung von Kraftstoffen — Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 1135/42.
- [9] Wilke, W.: Motorische Prüfung von Kraftstoffen — In: Beihefte zu den Zeitschriften des VDI Nr. 33 (Die Untersuchung von Treibstoffen für Vergasermotoren), Berlin: Verlag Chemie 1939, S. 1/7.
- [10] Wilke, W.: Über die Beziehung zwischen Oktanzahl und Cetanzahl — Autom.-techn. Z. Bd. 43 (1940) S. 148/49.

Neue Hefte **Deutsche Kraftfahrtforschung**
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

- Heft 62 Aufladungsvorgang von Viertakt Dieselmotoren. Von W. Riedel. In Vorbereitung.
- Heft 61 Der Spülvorgang auf Grund einer neuen Auffassung der Expansionsströmung. Von F. Schultz-Grunow VDI und K. Wieghardt. DIN A 4, 15 Seiten mit 15 Bildern. 1941. Broschiert 1,50 RM.
- Heft 60 Der Betrieb gemisch-gespülter Zweitaktmotoren mit Flüssiggas. Von U. Schmidt. DIN A 4, 16 Seiten mit 19 Bildern. 1941. Broschiert 1,50 RM.
- Heft 59 Das Schmiermittel im Zahnradgetriebe unter besonderer Berücksichtigung der Grenzreibung. Von E. Pietsch VDI. DIN A 4, 24 Seiten mit 20 Bildern, 25 Oszillogrammen und 2 Zahlentafeln. 1941. Broschiert 2,25 RM.
- Heft 58 Progressive Federung von Kraftwagen. Von E. Lehr VDI. DIN A 4, 12 S. mit 21 Bildern. 1941. Brosch. 1,15 RM.
- Heft 57 Versuche zur Frage der Kraftstoffaufbereitung durch die Einspritzdüse. Von W. Oschatz. DIN A 4, 32 Seiten mit 102 Bildern. 1941. Brosch. 3,— RM.
- Heft 56 Vorspannung und Dauerhaltbarkeit an Schraubenverbindungen mit einer und mehreren Schrauben. Von A. Thum VDI und H. Lorenz VDI. DIN A 4, 20 S. mit 34 Bildern und 13 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 1,85 RM.
- Heft 55 Kraftstoff und Motor beim Anlassen von Fahrzeugdieselmotoren. Mit folgenden Beiträgen: Der Einfluß der Zündwilligkeit des Kraftstoffes auf das Anlaßverhalten von Fahrzeugdieselmotoren. Von W. Rixmann. Einfluß der Drehzahl auf die Selbstzündungsbedingungen beim Anlassen von Dieselmotoren. Von F. Schaub. Die Anlaßdauer beim Fahrzeugdieselmotor in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Von H. J. Conrad. In Vorbereitung.
- Heft 54 Nachweis der Schmierfilmdurchbrechung durch Messen des elektrischen Übergangswiderstandes zwischen Kolbenring und Zylinder. Von R. Poppinga VDI. DIN A 4, 31 S. mit 41 Bildern. 1941. Brosch. 3,— RM.
- Heft 53 Das Aufspritzen des Kraftstoffes im Dieselmotor. Von K. Blume VDI. Zündverzugs-messung mittels Photozellen in verschiedenen Wellenlängen. Von K. Stallechner VDI. DIN A 4, 48 S. mit 66 Bildern und 8 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 4,50 RM.
- Heft 52 Vergleichende Untersuchungen an Lagerschalenwerkstoffen. Von E. Heidebrock VDI und A. Döring. DIN A 4, 12 S. mit 26 Bildern und 1 Zahlentafel. 1941. Brosch. 1,15 RM.
- Heft 51 Das Kühlgebläse des Kraftfahrzeugs und sein betriebliches Verhalten. Von B. Eckert VDI/ATG. DIN A 4, 43 S. mit 74 Bildern und 2 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 4,— RM.
- Heft 50 Die Luftkräfte und ihre Momente am Kraftwagen und die aerodynamischen Mittel zur Beeinflussung der Fahrtrichtungshaltung. Von E. Sawatzki. DIN A 4, 55 S. mit 3 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 3,40 RM.

Verzeichnis der früher erschienenen Hefte steht kostenlos zur Verfügung

Bezug durch jede Buchhandlung!



VDI-VERLAG GMBH · BERLIN NW7

L. 70 44180

Dresden, Mehlitz

Me

Deutsche Kraftfahrtforschung
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

Heft 76

001085

101

Einfluß der Luftbewegung auf die Ausbildung
des Kraftstoffstrahles in der Wirbelkammer

Dr.-Ing. Karl-Fritz Säuberlich VDI

Institut für Kolbenmaschinen der Technischen Hochschule
Dresden (Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlitz VDI)

1943

VDI-Verlag GmbH · Berlin NW 7

2.70

Deutsche Kraffahrtforschung
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

Heft 76

001086

**Einfluß der Luftbewegung auf die Ausbildung
des Kraftstoffstrahles in der Wirbelkammer**

Dr.-Ing. Karl-Fritz Säuberlich VDI

Institut für Kolbenmaschinen der Technischen Hochschule
Dresden (Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlig VDI)

Bibliothek

der
Ruhrchemie Aktiengesellschaft

Oberhausen-Höfen

Eingetragen unter

Nr. **3337**

1943

VDI-Verlag GmbH · Berlin NW 7

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Aufbau der Versuchsanlage	1
3 Strömungsverhältnisse in der Wirbelkammer	5
4 Versuchsergebnisse	8
41 Zur Auswertung der Versuchsergebnisse	8
42 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse	22
43 Verbrennungsaufnahmen	23
5 Zusammenfassung	25
6 Schriftumsverzeichnis	25

Die vorliegende Arbeit wurde im Auftrag und mit Mitteln des Reichsverkehrsministeriums im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden durchgeführt.

Alle Rechte vorbehalten · Copyright 1943 by VDI-Verlag G.m.b.H., Berlin NW 7
Printed in Germany · Druck A. W. Zickfeldt, Osterwieck am Harz
DW 991 — 04431,0

001087

1 Einleitung

Seit der Entwicklung der kompressorlosen Dieselmachine ist eine gute Gemischbildung eine der wichtigsten Fragen der Dieselmotorenentwicklung. Bei der Einblasung des Kraftstoffes mit Druckluft wurde durch diese eine gute Zerstäubung und Verteilung des Kraftstoffes erzielt, die bei der kompressorlosen Dieselmachine auf anderem Wege erreicht werden muß. Schon frühzeitig sind die drei hierfür zur Verfügung stehenden Wege erkannt und beschritten worden [20] ¹⁾:

1. Zerstäubung durch Teilzündung in einer besonderen Kammer (Vorkammer).
2. Verteilung des Kraftstoffes durch eine gerichtete Luftbewegung (Wirbelkammer).
3. Zerstäubung und Verteilung durch geeignete Ausbildung der Düsen und Anpassung des Brennraumes (Strahleinspritzmaschine).

Von diesen drei Verfahren ist das zweite bisher am wenigsten Gegenstand eingehender Untersuchungen geworden, während für die beiden anderen zahlreiche grundlegende Forschungsarbeiten vorliegen.

Über die zur Frage des Einflusses der Luftbewegung vorliegenden Arbeiten hat Zinner [23] einen Überblick gegeben. Die meisten der Arbeiten befassen sich mit der Luftbewegung im Zylinder des Motors, die, durch abgeschirmte Einlaßventile oder schräge Schlitze bei Zweitaktmotoren hervorgerufen, nur eine geringe Strömungsgeschwindigkeit aufweisen kann. Eingehendere Betrachtungen über die Arbeitsweise der Wirbelkammermotoren sind zuerst von Neumann [13] und Frey [4] sowie in einer Arbeit von Alcock [1], die besonders auf den Ricardo-Comet-Motor eingeht, angestellt worden. Diese Arbeiten sind unter Heranziehung von motorischen Untersuchungen auf theoretischen Betrachtungen aufgebaut. Dazu kommen amerikanische Untersuchungen [16, 17, 18, 24] über den Einfluß der Luftbewegung in verschiedenartigen Verbrennungsräumen, die mit Hilfe photographischer Aufnahmen einen Einblick in die Vorgänge zu geben versuchen, aber von den Verhältnissen in der Wirbelkammer zu weit abweichen. Es schien daher erforderlich, besonders an der Wirbelkammer Untersuchungen durchzuführen, die einen augenscheinlichen Überblick über die Vorgänge geben und als Grundlage zur Nachprüfung der theoretischen Betrachtungen mit herangezogen werden können. Darüber hinaus konnten noch allgemeine Erkenntnisse über die Ausgestaltung zerklüfteter Brennräume erwartet werden.

Im folgenden soll daher mit Hilfe des optischen Verfahrens, wie es ähnlich zur Untersuchung der Strahlausbildung der Düsen im Maschinenlaboratorium der T. H. Dresden mit Erfolg angewandt worden ist [5, 6, 10, 14], versucht werden, diesen Beitrag zur Klärung des Einflusses der gerichteten Luftbewegung in der Wirbelkammer zu geben. In dem Modell einer Wirbelkammer ist die Ausbildung der Kraftstoffstrahlen in einer Ebene als Schattenbild aufgenommen worden. Die Untersuchungen erstrecken sich nur auf die Kraftstoffverteilung in der Wirbelkammer ohne Zündung, während die Gemischbildung unter dem Einfluß der Verbrennung zunächst nicht berücksichtigt ist.

2 Aufbau der Versuchsanlage

Am eindeutigsten wird in den Wirbelkammermotoren die Luftbewegung zur Verbesserung der Gemischbildung herangezogen. Daher sind die Verhältnisse, wie sie in dem bekannten Ricardo-Comet-Motor E 16 vorliegen, als Vorbild für die Ausbildung der Versuchsanlage herangezogen worden.

Für die Versuche stand ein alter Deutzer Zweitaktmotor mit Kurbelkastenspülung zur Verfügung, der durch einen Elektromotor angetrieben wurde. Sein Hubvolumen ergab sich nach Abzug der Schlitzhöhe zu $V_h = 3030 \text{ cm}^3$. Die Höchstdrehzahl von 450 U/min wurde bei den Versuchen auf 500 U/min erhöht.

¹⁾ Die Zahlen in eckigen Klammern weisen auf das Schriftumsverzeichnis am Ende der Arbeit hin.

Für diesen Motor wurde ein Zylinderkopf entworfen, der die Wirbelkammer in Form eines beidseitig offenen Zylinders enthielt (Bild 1). Zwischen Wirbelkammerkopf und Zylinder wurde ein Zwischenstück geschaltet, in das ein rechteckiger Kolbenaufsatz in der Nähe des oberen Totpunktes eintritt. Dadurch wurde auch ein Stück des Zylinderraumes im Zwischenstück sichtbar gemacht. Einige Schwierigkeiten bereitete die Abdichtung der Fenster, da diese teilweise frei ohne Gegenlager den Zylinderraum für den Aufsatzkolben abschließen mußten. Nach einigen vergleichenden Versuchen mit verschiedenen Kitten bewährte sich eine Ausführung, bei der die Scheiben mit eingepreßten dünnen Streifen eines Dichtungstoffes in den Rahmen befestigt wurden. Die Rahmen wurden mit Schrauben und Knebeln über schmale Kupferdichtungen gegen den Zylinderkopf gepreßt (Bild 2).

Durch Auswechseln verschiedener Einsätze (Bild 3) konnte der Überströmkanal verengt und damit die Luftgeschwindigkeit erhöht werden. Verschiedene Einspritzrichtungen wurden durch drei Bohrungen unter verschiedenen Winkeln im Kopf ermöglicht, in denen jeweils die Einspritzdüse, ein Druckgeber und das Dekompressionsventil, das zum Anfahren erforderlich war, untergebracht wurden.

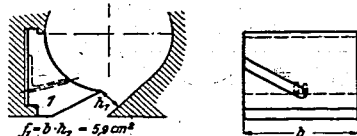


Bild 3. Einsätze für die Wirbelkammer mit verschiedenen Überströmquerschnitten f_1 bis f_4 .

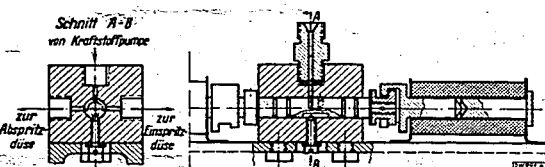


Bild 4. Elektromagnetisch gesteuerter Kraftstoffumschalter.

Die Verhältnisse des Versuchsmotors konnten denen des Ricardo-Comet-Motors E 16 nicht ganz angeglichen werden, da aus konstruktiven Gründen sowohl das Verdichtungsverhältnis, wie der Anteil der Wirbelkammer am Verdichtungsraum unter den Werten des Vorbildes blieben.

Um Fenster und Triebwerk zu schonen, sollte die Einspritzung des Kraftstoffes nur zum Zeitpunkt der Aufnahme erfolgen. Die dauernd mitlaufende Kraftstoffpumpe förderte den Kraftstoff normal über eine Abspritzdüse. Erst kurz vor der Aufnahme wurde durch einen elektromagnetisch gesteuerten Umschalter (Bild 4) der Weg zur Einspritzdüse freigegeben. Da der Kolben des Um-

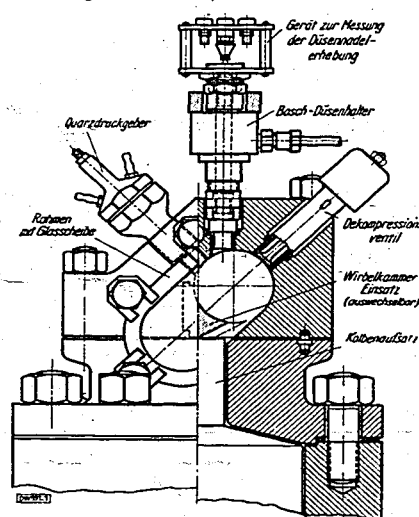


Bild 1. Aufbau der Wirbelkammer.

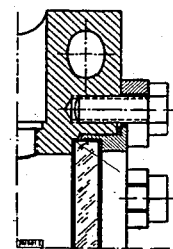


Bild 2. Einbau und Abdichtung der Glasfenster.

steuergerätes trotz sorgfältigen Einschleifens nicht einwandfrei dicht hielt, wurde die Steuerung so ausgebildet, daß jeweils zwei Einspritzungen erfolgten, von denen erst die zweite aufgenommen wurde. Die Kraftstoffpumpe war mit der Schaltwalze für die elektrische Steuerung gekuppelt und wurde über ein Kettengetriebe mit halber Motordrehzahl angetrieben.

Da mitunter unerwünschte Zündungen aufgetreten waren, durch die der Film völlig geschwärzt wurde, wurde der Motor später mit Stickstoff betrieben, der im Kreislauf über einen Windkessel umgewälzt wurde.

Die Einspritzmenge wurde entsprechend der im Ricardo-Motor bei Vollast gebrauchten eingestellt, die aus früheren Versuchen [8] zu etwa 90 mg/Hub ermittelt wurde. Für den Versuchsmotor ergab sich damit aus dem Verhältnis der Hubvolumina die Einspritzmenge von 168 mg/Hub, mit der dauernd gefahren wurde. Die Einspritzzeiten waren etwa dieselben wie beim Ricardo-Motor.

Da sich die Untersuchungen zunächst auf die Gemischbildung ohne Zündung beschränken sollten, wurde für die Aufnahmen Funkenbelichtung vorgesehen. Diese gestattet bei hoher Bildfrequenz ein günstiges Verhältnis der Bildwechselzeit zur Belichtungszeit, da der Funkenüberschlag nur etwa 10^{-6} s dauert und trotzdem eine für die Bildschwärzung ausreichende Lichtmenge ausgelöst werden kann. Es stand die von Lindner [7] für seine Schlierenuntersuchungen der Explosionsvorgänge entwickelte Funkenanlage zur Verfügung, die zunächst ohne größere Änderungen übernommen wurde. Eine Batterie von acht Kondensatoren wurde über einen Hochspannungsschalter nacheinander ausgelöst. Mit derselben Drehzahl wie der Hochspannungsschalter wurde

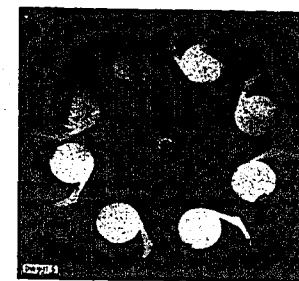


Bild 5. Filmscheibe mit Einspritzbildern.

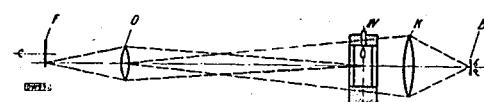
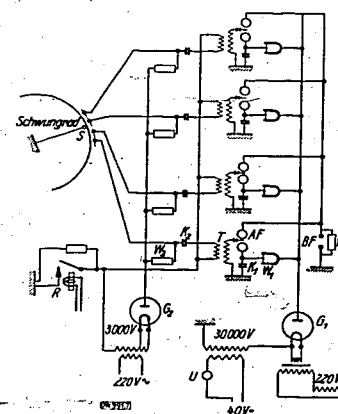


Bild 6. Schema der optischen Anordnung.

BF Belichtungsfunkenstrecke;
H Blende mit Paushaut;
K Kondensator;
W Widerstand;
T Tesla-Transformator;
AF Auslösefunkenstrecke;
R Funkenrelais;
S Schwungrad mit Steuerkontakt.

Bild 7. Schaltung der Belichtungs- und Steuerfunkenkreise.

eine Filmscheibe angetrieben, so daß auf ihr acht Bilder im gleichen Abstand aufgenommen werden konnten (Bild 5). Der Antrieb erfolgte durch schnellaufende Motoren mit einer Drehzahl von 22 500 U/min, wobei sich eine Bildfrequenz von 3000 Bildern je s ergab, entsprechend einem Bildabstand von 1° KW bei einer Motordrehzahl von 500 U/min.

Der Durchmesser der Filmscheibe wurde mit Rücksicht auf die hohe Drehzahl zu 12 cm gewählt, wodurch eine Verkleinerung von 1:3 bedingt war. Die Funkenstrecke wurde durch eine Lochblende mit Paushaut abgedeckt, um Unregelmäßigkeiten des Funkenüberschlages auszugleichen und eine gleichmäßigere Belichtung zu erreichen. Das ausgestrahlte Licht wurde durch einen Kondensor von 23 cm Dmr. und 18 cm Brennweite gesammelt und in der Hauptebene des Objektivs konzentriert (Bild 6). Als Objektiv diente ein Zeiß-Tessar von 21 cm Brennweite und einem Öff-

nungsverhältnis von 1:4,5 mit Compurverschuß, der auf $\frac{1}{100}$ s eingestellt war und durch einen Elektromagneten ausgelöst wurde, um den Einfluß des Tageslichts auszuschalten. Die optische Achse des Systems war auf die Mitte der Wirbelkammer ausgerichtet.

Infolge der Selbstinduktion in den langen Leitungen von der auf einem erhöhten Podium im Nebenraum aufgestellten Kondensatorbatterie ergab sich an der Belichtungsfunktenstrecke ein starkes Nachleuchten, das keine scharfen Aufnahmen erreichen ließ. Der Hochspannungssteuerschalter war ebenfalls eine Quelle steter Unsicherheit, indem bei der Auslösung meist mehrere Kondensatoren gleichzeitig entladen wurden, wodurch die gewünschte Bildzahl nicht erreicht und die Bilder ungleichmäßig belichtet wurden. Deshalb wurde die Funkensteuerung gänzlich umgebaut. Die Kondensatoren wurden unmittelbar hinter dem Versuchsmotor aufgestellt, so daß sich kurze Leitungen zur Belichtungsfunktenstrecke ergaben. Die Steuerung wurde vom Hochspannungsteil weggenommen und einem besonderen Steuerfunkenkreis mit niedrigerer Spannung übertragen (Bild 7). Für die Aufladung der acht Kondensatoren von je $0,01 \mu F$ wurde die vorhandene Ein-

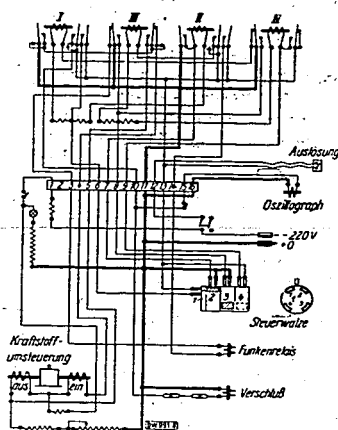


Bild 8. Schaltbild der elektrischen Steuerung.

richtung beibehalten, bei der die Gleichspannung einer 40-V-Batterie durch einen Quecksilberunterbrecher U zerhackt, in einem Induktor auf etwa 30 000 V umgespannt und in einem Glühkathodenventil G , gleichgerichtet wurde. Die Aufladung erfolgte dauernd über Wasserwiderstände W_1 . Die Kondensatoren K , waren einseitig geerdet und standen auf der anderen Seite über eine Auslösefunkenstrecke AF mit der Belichtungsfunktenstrecke BF in Verbindung, die ebenfalls einseitig geerdet und durch einen hochohmigen Widerstand W_2 überbrückt war. Zwischen dem einen Pol der Auslösefunkenstrecke und einer Hilfselektrode wurde ein Auslösefunken über einen Tesla-Transformator T zum Überschlagn gebracht, durch den die Strecke ionisiert und der Kondensator zur Entladung gebracht wurde. Der Steuerkreis war ähnlich aufgebaut. Ein von einem Röhrengleichrichtergerät G_2 über einen Widerstand W_2 dauernd aufgeladener Kondensator K_2 von $0,1 \mu F$ wurde über die Primärseite des Tesla-Transformators entladen, wenn auf der einen Seite der Kreis durch ein Relais, das den Beginn des Vorganges steuerte, über Erde geschlossen war und auf der anderen Seite ein auf dem Schwungrad des Versuchsmotors befestigter Kontakt an den Gegenkontakten, die mit den einzelnen Kondensatoren verbunden waren, vorbeistrich. Die Gegenkontakte waren im Abstand von je 1° KW angebracht, so daß je Grad Kurbelwinkel ein Bild aufgenommen wurde. Der Kontakt am Schwungrad war verstellbar, so daß die Aufnahmereihe zu beliebigen Zeitpunkten beginnen konnte.

Da die Steuerung der Belichtungsfunkten vom Hochspannungsverteiler weg an das Schwungrad verlegt war, mußte bei der neuen Anordnung die Drehzahl der Filmscheibe in einem be-

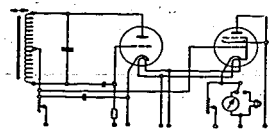


Bild 9. Schaltung der induktiven Düsenadelweg-Meßvorrichtung.

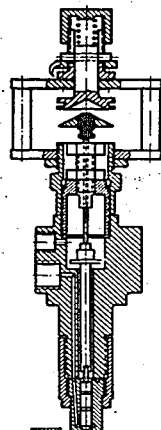


Bild 10. Düsenhalter mit Meßgerät zur Düsenadelhub-Aufzeichnung.

001089

stimmten Verhältnis zur Motordrehzahl eingestellt werden, um die Bilder gut verteilt auf die Scheibe zu bekommen. Die Drehzahlen wurden an Hand eines Einstellendiagramms, in dem für den größten und kleinsten Bildabstand die Grenzkurven eingetragen waren, aufeinander abgestimmt.

Die Vielzahl der Schaltungen, die in bestimmtem kurzen Abstand hintereinander erfolgen sollte, wurde einer elektrischen Steuerung übertragen (Bild 8): „Kraftstoffumschalter ein, Objektivverschluß und Oszillograph, Belichtungsfunktenrelais und Kraftstoffumschalter aus“ waren in dieser Reihenfolge zu schalten. Die zeitliche Aufeinanderfolge wurde durch eine Steuerwalze, die mit der Kraftstoffpumpenwelle gekuppelt war, gesteuert. Die Sicherung der richtigen Aufeinanderfolge und die Verriegelung nach Ablauf des Vorganges wurde von mehreren Relais übernommen, so daß nach Einlegen des Auslöseschalters der ganze Vorgang automatisch abließ und sich nicht wiederholen konnte. Kraftstoffumschalter und Oszillograph waren gesondert abschaltbar, um die Einstellung ohne diese vornehmen zu können. Der Auslöseschalter war beweglich angeordnet, so daß die Auslösung von jedem Punkte der Anlage aus, von dem die Beobachtung der Vorgänge erwünscht war, vorgenommen werden konnte.

Zur Auswertung der in der Wirbelkammer gemachten Aufnahmen ist die Kenntnis ihrer Lage zum oberen Totpunkt des Motors und zum Einspritzverlauf erforderlich. Daher wurden auf einem Siemens-Schleifen-Oszillographen Diagramme aufgenommen, die neben der Zeitmarke die Düsenadelhubkurve und die Totpunktmarken enthalten. Die Belichtungsfunktenüberschläge markierten sich dabei als Ausschläge in der Düsenadelhubkurve, wodurch bei manchen Aufnahmen leider die Bestimmung des Beginns und des Endes der Einspritzung unsicher wurde.

Um bei dem eingestellten Bildabstand von 1° KW den Fehler der Auswertung auf 10 % zu begrenzen, mußte die Ablesung auf $0,1^\circ$ KW genau erfolgen. Dazu ist bei einer Motordrehzahl von 500 U/min und einer Ablesegenauigkeit von 0,2 mm eine Papiergeschwindigkeit von mindestens 6 m/s erforderlich. Es wurde meist mit 8 m/s gefahren.

Die Totpunktmarke wurde nach dem induktiven Verfahren [10] durch Weicheisenanker und Magnetspulen aufgezeichnet. Teilweise wurde auch der Druckverlauf in der Wirbelkammer mit einem piezo-elektrischen Indikator aufgenommen [10, 11].

Zur Aufzeichnung der Düsenadelhubkurve wurde ein von Meurer angegebenes Gerät benutzt (Bild 9), das auf dem Induktionsverfahren von H. A. Thomas beruht [21]. Auf der Düsenadel ist ein leichter Teller von hohem Ohmschen Widerstand angebracht. Bei seiner Annäherung an die Spule eines von einer Röhre gespeisten hochfrequenten Schwingungskreises induziert er in der Spule rückwirkend Wirbelströme, deren Spannungen bei richtiger Abstimmung der Widerstände den Spannungen im Hochfrequenzkreis entgegengesetzt gerichtet sind und ihren Bereich einengen. Bei richtiger Wahl der Verhältnisse kann man es einrichten, daß sich der Anodenstrom proportional zum Nadelhub ändert. Die Änderung des Anodenstromes wird in einer zweiten Röhre verstärkt und der Meßschleife zugeleitet. Die Spule war so ausgebildet, daß sie zum Eichen des Gerätes dem Teller genähert werden konnte, wobei die Spulenstellung an einer Skala abgelesen wurde (Bild 10).

Um einen Anhaltspunkt für den Wärmezustand der Kammer zu haben, wurden die Wandtemperaturen der Einsätze 2 und 4 gemessen, indem zwei Thermolementendrähte nebeneinander im Einsatz vernietet wurden (Bild 3). Für beide Einsätze stellte sich die Temperatur bei der Aufnahme auf ungefähr 200° C ein. Das entspricht ungefähr der Temperatur, die auf dieselbe Art an der Glühsole eines Oberhänsli-Wirbelkammermotors bei Leerlaufbetrieb gemessen wurde.

3 Strömungsverhältnisse in der Wirbelkammer

Die Frage der Strömungsverhältnisse bei unterteilten Verdichtungsräumen ist im Schrifttum häufig behandelt worden [1, 4, 9, 12, 13, 15, 19]. In den meisten Fällen wird aus den gemessenen oder errechneten Druckdifferenzen der beiden Verdichtungsräume die Geschwindigkeit im engsten Überströmquerschnitt berechnet, wobei neben einigen weiteren Größen ein Polytropenexponent m für die Verdichtung in beiden Räumen angenommen wird. Aus der Geschwindigkeit läßt sich dann das jeweils überschobene Luftgewicht und damit die Änderung der eingeströmten Energie errechnen. Eine Integration der Energieänderung ergibt die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt in die Kammer geschickte Strömungsenergie. Auf den Verlauf der zu berechnenden Größen sind nach Schlawke [19] und Pischinger [15] außer dem Schubstangenverhältnis, das in den meisten praktischen Fällen als gleich anzunehmen ist, folgende Größen von Einfluß:

$$1. \text{ Das Verdichtungsverhältnis } \varepsilon = (V_h + V_c)/V_c$$

V_h = Hubvolumen,

V_c = Volumen des gesamten Verdichtungsraumes.

2. Der Anteil σ der Kammer am Verdichtungsraum; $\sigma = V_k/V_c$

V_k = Kammervolumen.

3. Ein Ähnlichkeitsfaktor, in dem alle übrigen maßgebenden Größen enthalten sind.

Schlaefke bestimmt diesen Faktor zu $C = \frac{n V_h}{30 \mu f}$. (Dimensionen: V_h [m³], f [m²].)

Pischinger definiert den Ähnlichkeitsfaktor $K = \frac{\mu f \sqrt{T_0}}{n V_h}$. (Dimensionen: V_h [dm³], f [cm²].)

f engster Überströmquerschnitt, μ [—] Ausflußkoeffizient zu f , T_0 [°K] Anfangstemperatur der Verdichtung, n [U/min] Drehzahl des Motors, V_h Hubvolumen.

Wenn man den bei Schlaefke zugrunde gelegten Wert $T_0 = 288^\circ$ einsetzt, stehen die beiden Faktoren in dem Verhältnis $K = 5,67/C$. Nur bei Änderung einer dieser drei Größen werden sich die Strömungsverhältnisse ändern, und aus den in den beiden Arbeiten gegebenen Kurven läßt sich Größe und Richtung der Änderung abschätzen.

Bei der angegebenen Art der Berechnung bleibt der Einfluß der Aufheizung des übergeschobenen Luftgewichtes unberücksichtigt, der bei Anwendung wärmeisolierter Glühshalen oder Vorkammer-einsätze tatsächlich besonders ausgeprägt in Erscheinung treten wird. Durch eine solche Wärmezufuhr wird der Verdichtungs exponent in der Kammer größer, der Kammerdruck steigt rascher und die Druckdifferenz beider Räume wird wesentlich geringer, worauf schon Mehlig [9] hingewiesen hat.

Ferner hat Dreyhaupt [3] bei seiner Untersuchung des Lanovamotors gefunden, daß sich beim Überschieben des Luftgewichtes in die Kammer ein Schwingungsvorgang ausbildet. An Hand von Indikatordiagrammen zeigt er, daß der Druck in der Kammer schon vor dem oberen Totpunkt über den Druck im Zylinder zu steigen beginnt. Aus der Form der Differenzdruckkurve läßt sich auf einen Schwingungsvorgang schließen, der sich infolge der Trägheit der Luftmasse ausbildet. Ein eingehenderes Studium dieser Vorgänge kann nur an Hand sehr genauer Differenzdruckdiagramme von geeigneten Unterteilungsräumen erwartet werden.

Für die vorliegenden Untersuchungen ergibt sich aus den Kurven von Schlaefke und Pischinger, daß bei den sehr niedrigen C -Werten bzw. hohen K -Werten der Versuchsanlage keine erheblichen Druckdifferenzen zwischen Zylinder und Wirbelkammer auftreten werden, wie auch Neumann [13] (Oberhänsli-Motor) und Frey [4] (Linke-Diesel) ihre Berechnungen für die Wirbelkammer ohne Berücksichtigung der Druckdifferenz durchgeführt haben.

Mit Rücksicht auf die vorhergehenden Ausführungen wurde daher auf eine genaue Ermittlung der Strömungsverhältnisse verzichtet. Um aber wenigstens ein Bild der Größenordnung der Strömung in den verschiedenen Querschnitten zu geben, sind die Verhältnisse unter wesentlich vereinfachenden Annahmen ermittelt worden.

Der Rechnung werden folgende Bezeichnungen und Werte zugrunde gelegt:

- $V_k = 135 \text{ cm}^3$ Volumen der Wirbelkammer,
- f [cm²] engster Querschnitt des Überströmkanals (siehe Bild 3),
- μ [—] Ausflußzahl des Überströmquerschnittes zu 0,6 angenommen,
- $n = 500 \text{ U/min}$ Drehzahl des Motors,
- α [° KW] Kurbelstellung ($\alpha = 0$ oberer Totpunkt),
- V_z [cm³] Volumen im Zylinder bei der jeweiligen Kurbelstellung α ,
- $V = (V_k + V_z)$ [cm³] Gesamtvolumen abhängig von α ,
- dV_z [cm³] Änderung des Zylindervolumens,
- dV_z [cm³] Volumen des jeweils übergeschobenen Luftgewichtes,
- G_z [kg] übergeschobenes Luftgewicht,
- G [kg] angesaugtes Luftgewicht:

$$G = \frac{P_0 V_h}{R T_0} = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$P_0 = 1 \text{ at} = 10^5 \text{ kg/m}^2$ Anfangsdruck, $V_h = 3,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ Hubvolumen, $R = 29,3 \text{ m}^2/\text{C}^\circ$ Gaskonstante der Luft, $T_0 = 320^\circ \text{ K}$ Anfangstemperatur.

Wie bereits angedeutet, werden einige vereinfachende Annahmen gemacht. Zunächst ist Temperatur- und Druckgleichheit in beiden Räumen angenommen worden, und weiter wird damit gerechnet, daß die Luftdichte an allen Stellen gleich groß ist. Von dem durch den Kolben verdrängten Volumen wird ein dem Verhältnis der Räume entsprechender Teil in die Kammer übergeschoben.

$$\frac{dV_z}{dV_z} = \frac{V_k}{V_k + V_z}; \quad dV_z = dV_z \frac{V_k}{V}$$

Die Luftgeschwindigkeit im engsten Querschnitt wird dann:

$$v = \frac{1}{\mu f} \frac{dV_z}{dt} \quad \text{und mit} \quad dt = \frac{d\alpha}{6n}$$

$$v = \frac{6n}{\mu f} \frac{dV_z}{d\alpha} = \frac{6n V_k}{\mu f} \frac{1}{V} \frac{dV_z}{d\alpha}$$

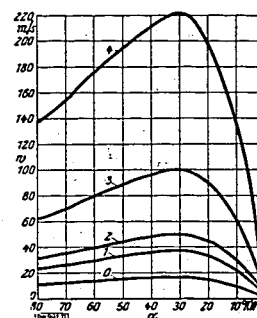


Bild 11. Errechnete Strömungsgeschwindigkeit v für verschiedene Überströmquerschnitte (Wirbelkammer-einsatz 1 bis 4) in Abhängigkeit von der Kurbelstellung α . (0 ohne Wirbelkammer-einsatz).

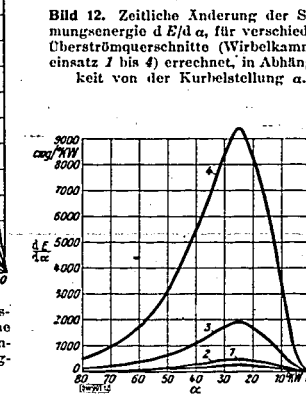


Bild 12. Zeitliche Änderung der Strömungsenergie $dE/d\alpha$ für verschiedene Überströmquerschnitte (Wirbelkammer-einsatz 1 bis 4) in Abhängigkeit von der Kurbelstellung α .

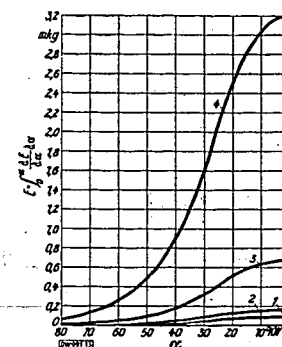


Bild 13. Strömungsenergie $E = \int_0^\alpha \frac{dE}{d\alpha} d\alpha$ für verschiedene Überströmquerschnitte errechnet, in Abhängigkeit von der Kurbelstellung α .

Hiermit sind die in Bild 11 aufgetragenen Werte berechnet worden. Die Änderung der Strömungsenergie beträgt:

$$dE = \frac{v^2}{2g} dG_z, \quad dG_z = \gamma dV_z, \quad \gamma = G/V.$$

Damit wird

$$dE = \frac{v^2}{2g} \frac{G}{V} \frac{dV_z}{d\alpha} d\alpha, \quad \frac{dE}{d\alpha} = \frac{G}{2g} \left(\frac{6n V_k}{\mu f} \right)^2 \frac{1}{V} \left(\frac{dV_z}{d\alpha} \right)^2$$

In Bild 12 sind die Werte der Änderung der Strömungsenergie und in Bild 13 die gesamte Überströmungsenergie E bis zum jeweiligen Zeitpunkt, $E = \int_0^\alpha \frac{dE}{d\alpha} d\alpha$, über α aufgetragen.

Es soll untersucht werden, welcher Einsatz den im Ricardo-Motor E_{18} herrschenden Verhältnissen am nächsten kommt. Da weder das Verdichtungsverhältnis ϵ noch der Kammeranteil σ der beiden Motoren übereinstimmen, lassen sich die C -Werte nicht ohne weiteres zum Vergleich heranziehen. Für die Werte des Ricardo-Motors: $\epsilon = 17,4$; $\sigma = 0,77$ und $C = 0,44 \cdot 10^3$ (mit $\mu = 0,6$ angenommen) ergibt sich aus der entsprechenden Kurve bei Schlaefke [19, Bild 8] $E/V_h = 1,15 \text{ mkg/l}$. Nun wurde die Kurve mit E/V_h über C für den Versuchsmotor in dem fraglichen

Bereich aufgestellt und daraus ermittelt, daß der Versuchsmotor mit einem $C = 0,75 \cdot 10^3$ gefahren werden müßte, um denselben Energiewert wie der Ricardo-Motor zu erreichen.

Für die untersuchte Anlage ergeben sich mit den verschiedenen Einsätzen (Einsätze und engste Überströmquerschnitte siehe Bild 2, $\mu = 0,6$) folgende C -Werte:

$$C_1 = 0,1425 \cdot 10^3, C_2 = 0,191 \cdot 10^3, C_3 = 0,382 \cdot 10^3, C_4 = 0,841 \cdot 10^3.$$

Die Verhältnisse im Ricardo-Motor liegen also zwischen denen der Einsätze 3 und 4 und kommen denen bei Einsatz 4 sehr nahe.

Bei der Beurteilung der Einflüsse erhebt sich die Frage, ob für die Gemischbildung in der Wirbelkammer die Änderung dE/da der Strömungsenergie oder die Größe E der Strömungsenergie maßgebend ist. Auf eine bessere Verteilung des Kraftstoffes in der Luft ist nur eine geordnete Luftströmung von Einfluß, während die Turbulenz, die neben der geordneten Strömung mehr oder weniger gleichfalls auftritt, nur für die bessere Aufteilung des Kraftstoffes in Frage kommt (siehe Zinner [23]). Wie später bei der Besprechung der Versuchsergebnisse gezeigt wird, wird bei tangentialer Einstromung der Luft in die Wirbelkammer ein Luftwirbel erzeugt, der den eingespritzten Kraftstoff an die Wand drückt und auch weit nach dem oberen Totpunkt noch bestehen bleibt. Demnach muß in der Wirbelkammer die Strömungsenergie E ausschlaggebend sein, die den Kammerinhalt in eine Rotation versetzt und erst allmählich durch Reibung an den Wänden vernichtet wird.

Allerdings ist dieser Reibungseinfluß noch deutlich spürbar, so daß die in jedem Augenblick in der Wirbelkammer vorhandene wirksame Strömungsenergie unter dem Werte der eingeströmten Energie bleiben und, wenn diese nicht mehr zunimmt, allmählich abklingen wird. (An Hand des Bildes 26 wird später noch einmal auf diese Verhältnisse hingewiesen.) Im Gegensatz dazu wird in der Vorkammer mit zentraler Einstromung infolge der fehlenden Luftführung keine geordnete Strömung über längere Zeit auftreten. Eine geordnete Strömung wird das jeweils übergeschobene Luftgewicht nur auf dem kurzen Wege bis zur gegenüberliegenden Wand ergeben, an der sie gebrochen und in ungeordnete Bewegung verwandelt wird. Deshalb ist in der Vorkammer für eine entsprechende Beeinflussung des Kraftstoffstrahls die Änderung der Strömungsenergie maßgebend.

Auf der Skizze Bild 14 sind diese Zusammenhänge schematisch dargestellt, wobei mit W die zur Verteilung des Kraftstoffes wirksame Energie bezeichnet ist.

4 Versuchsergebnisse

41 Zur Auswertung der Versuchsergebnisse

Um die Lage des jeweiligen Einspritzbildes zum oberen Totpunkt bestimmen zu können, wurde gleichzeitig mit jeder Bildreihe ein Oszillogramm aufgenommen, auf dem neben der Zeitmarke und der Totpunktmarke die Kurve der Düsenadelerhebung aufgezeichnet ist (Bild 15). In letzterer ist jeder Funkenüberschlag als Ausschlag markiert. Der Oszillographenschluß ist während ungefähr $3\frac{1}{2}$ Motorumdrehungen offen, so daß auf dem Diagramm drei Totpunktmarken zu sehen sind, die aber jedesmal um über eine Umdrehung der Oszillographentrommel versetzt sind. Bei der Auswertung wurde zunächst die Strecke zwischen zwei Totpunktmarken, $360^\circ \text{ KW} = y \text{ mm}$, ermittelt und mit Hilfe der Zeitmarke die Übereinstimmung mit der am Tachometer abgelesenen Drehzahl des Motors überprüft. Dann wurde der Abstand z [mm] jedes einzelnen Funkenüberschlages vom oberen Totpunkt ausgemessen und daraus die Lage x des zugehörigen Bildes, $x = \frac{360}{y} z [^\circ \text{ KW}]$ vor oder nach o. T. ermittelt, wobei der obere Totpunkt $= 0^\circ \text{ KW}$ gesetzt und Kurbelwinkelgerade nach o. T. mit $+$ bezeichnet wurden. Ebenso wurde die Lage des Einspritzbeginns und -endes zum o. T. ermittelt.

Dabei ist zu beachten, daß die in der Hauptsache untersuchte Kegelpfendüse A eine Verzögerungsdüse ist; das heißt, die Einspritzung beginnt erst nach einem bestimmten Nadelhub. Der wirksame Ausflußquerschnitt μ für den jeweiligen Nadelhub der untersuchten und anschließend beschriebenen Düsen wurde ermittelt (Bild 16). Die Kurve für Düse A in Bild 16 zeigt, daß die Kegelpfendüse erst bei etwa 1,7 mm Nadelhub schleichend einzuspritzen beginnt. Aus der Eichkurve für das Düsenadelerhebungs-Meßgerät (gestrichelte Kurve in Bild 16) ist dafür eine Erhebung von 3,5 mm im Diagramm zu entnehmen. Dieser Wert stimmt auch mit dem Beginn der Einspritzung auf den Bildern gut überein.

Neben der Kegelpfendüse A wurden noch zwei andere Düsen untersucht, die in ihrem Einspritzverhalten stark voneinander abweichen: eine Flachsitzdüse B und eine Zylinderzapfendüse C. Für alle Düsen wurde der Abspritzdruck bei den Versuchen einheitlich zu 100 at gewählt. Nach den Untersuchungen von Oschatz [14] bildet sich bei der Zylinderzapfendüse C eine geballte Strömung aus, d. h. der Kraftstoff verläßt die Düse als geschlossener Strahl. Dagegen verursacht die

Flachsitzdüse B eine aufgelockerte Strömung, der Kraftstoff breitet sich nach dem Austritt aus der Düse schleierartig aus, wodurch der Zerfall in kleine Tröpfchen begünstigt wird. Bei der Kegelpfendüse A erhält der Kraftstoff durch die Form des Zapfens seine Richtung vorgezeichnet und tritt als Kegelmantel mit innerem Hohlraum aus. Diese Austrittsformen zeigen sich deutlich nur beim Ausspritzen in die Atmosphäre, während bei Gegendruck der Luft die Strahlform geändert wird. Die drei Düsen und ihre Abspritzformen sind in den Bildern 17 bis 19 gezeigt. Die Auf-

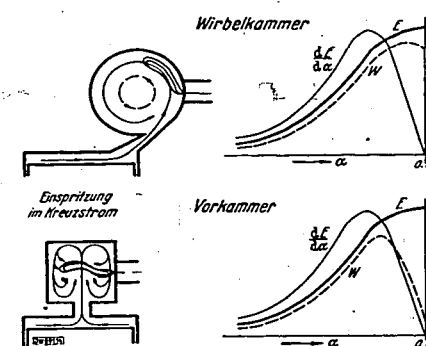


Bild 14. Gegenüberstellung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammer und Vorkammer.

$\frac{dE}{da}$ zeitliche Änderung der Strömungsenergie im Überströmquerschnitt;

$E = \int \frac{dE}{da} da$ Strömungsenergie im Überströmquerschnitt;

W angenommener Verlauf des in der Kammer wirksamen Energieanteiles.

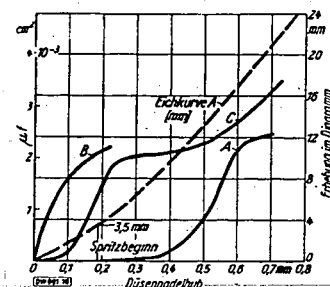


Bild 16. Wirksamer Ausflußquerschnitt μ der untersuchten Düsen A, B, C und Eichkurve des Düsenadelerhebungs-Meßgerätes (für Düse A).

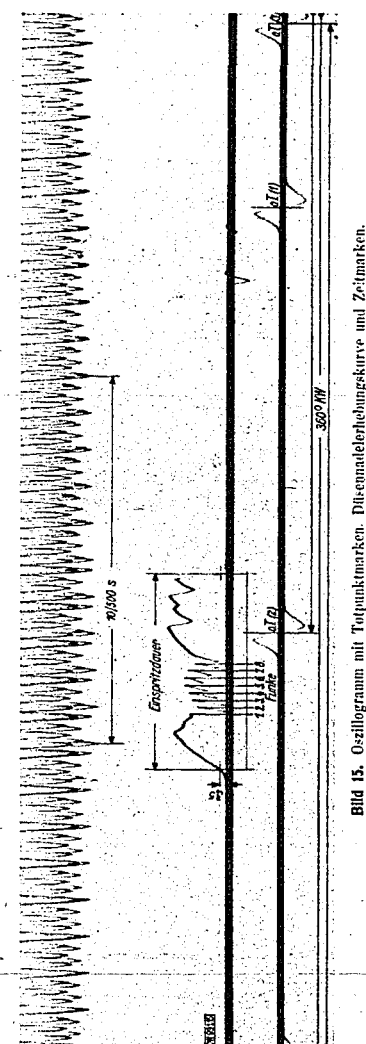


Bild 15. Oszillogramm mit Totpunktmarken, Düsenadelerhebungskurve und Zeitmarken.

Bibliothek
der
Ruhrahme Aktiengesellschaft
Oberhausen - Herten

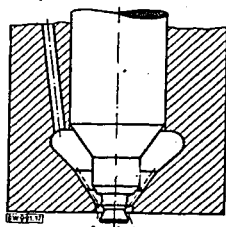
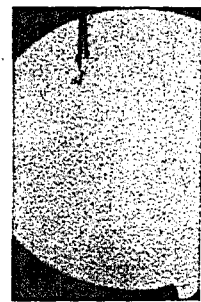


Bild 17. Kegelspritzdüse A mit Strahlbildern bei Ausspritzen in Atmosphäre ($n_M \approx 400$ U/min).



a) 0,5 kW nach Spritzbeginn;



b) 1,2 kW nach Spritzbeginn;



c) 2,4 kW nach Spritzbeginn.

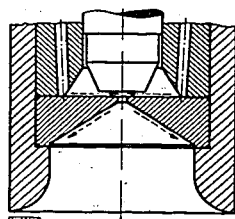
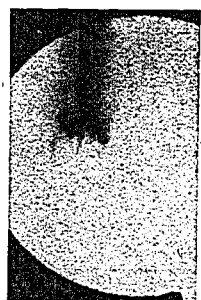
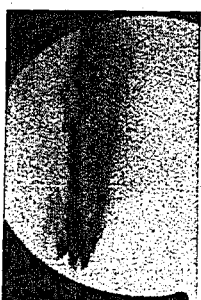


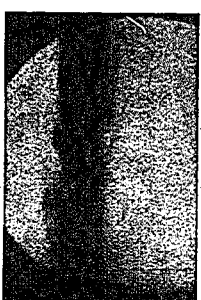
Bild 18. Flachsitzdüse B mit Strahlbildern bei Ausspritzen in Atmosphäre ($n_M \approx 400$ U/min).



a) 0,2 kW nach Spritzbeginn;



b) 0,9 kW nach Spritzbeginn;



c) 3,2 kW nach Spritzbeginn.

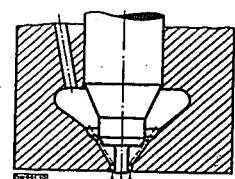
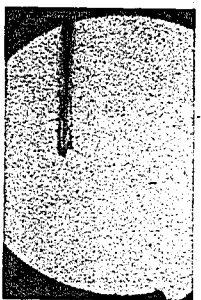


Bild 19. Zylinderzapfendüse C mit Strahlbildern bei Ausspritzen in Atmosphäre ($n_M \approx 400$ U/min).



a) 0,2 kW nach Spritzbeginn;



b) 0,9 kW nach Spritzbeginn;



c) 3,4 kW nach Spritzbeginn.



Bild 20. Schematische Darstellung des Einflusses der Perspektive und der Tiefenschärfe.

T Tiefenschärfe;
* zulässiger Zerstreuungskreis eines Bildpunktes;
z Abstand des Randes der Aufnahmeebene vom Bildrand.

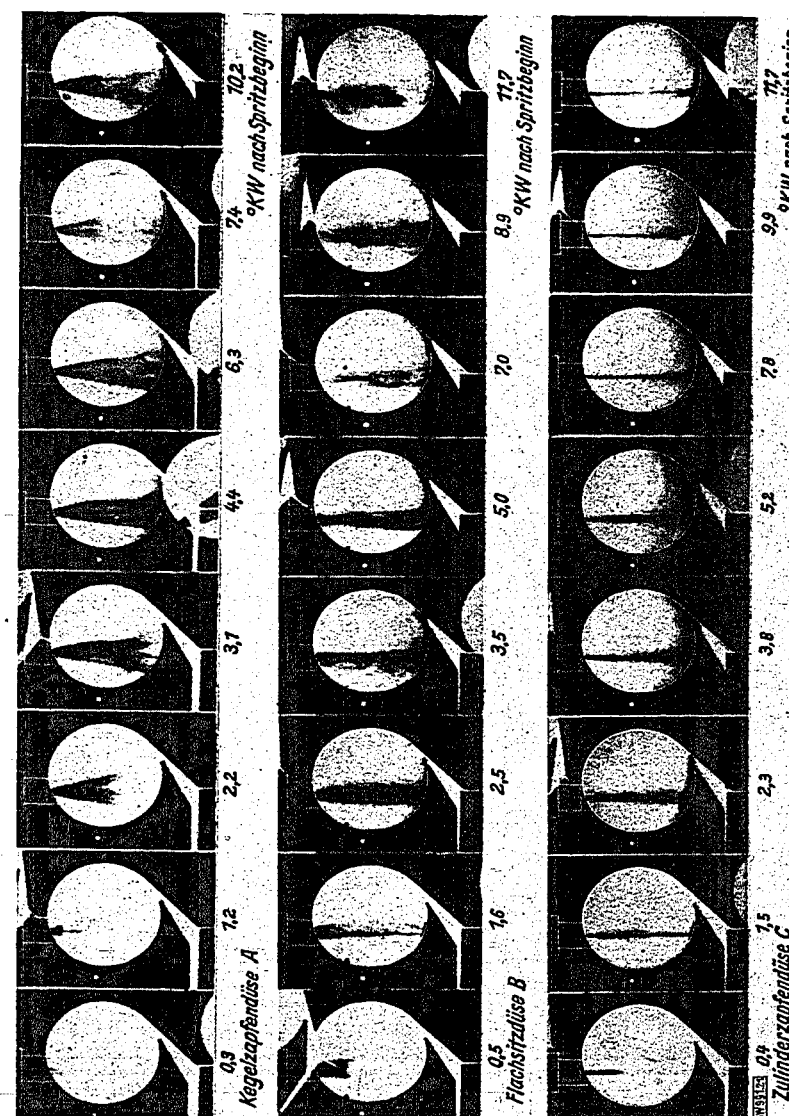


Bild 21. Strahlentwicklung der drei untersuchten Düsen bei Ausspritzen in die Atmosphäre.

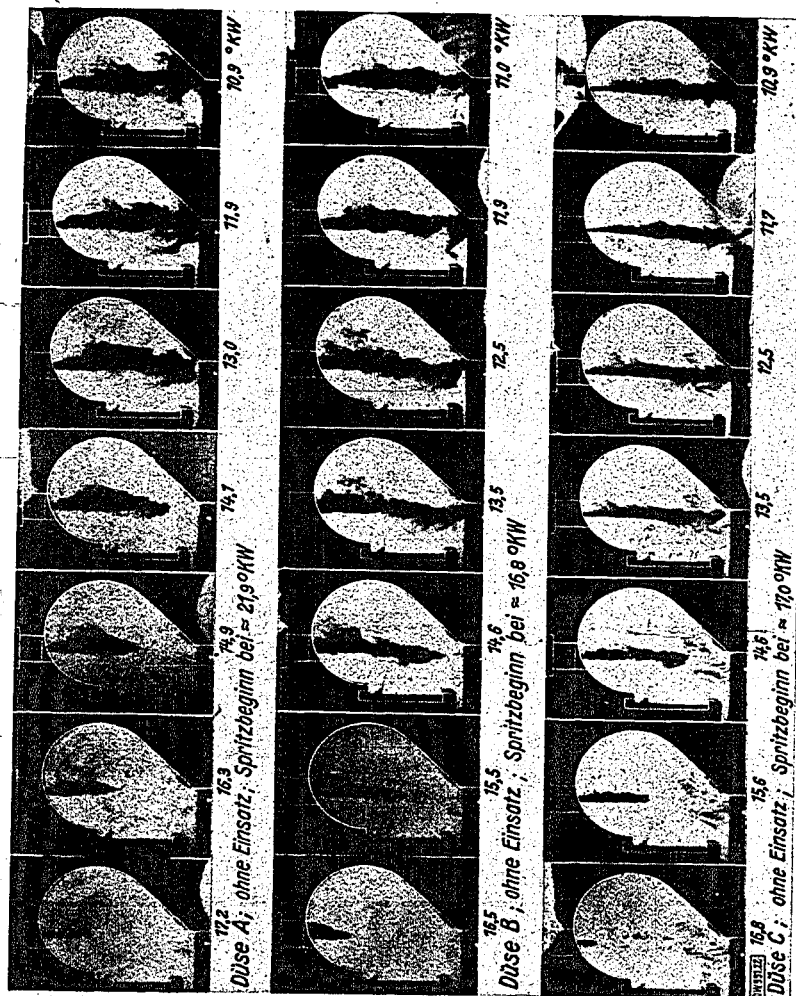


Bild 22. Strahlentwicklung der drei untersuchten Düsen bei Einspritzen in die Wirbelkammer ohne Einsatz.

001093

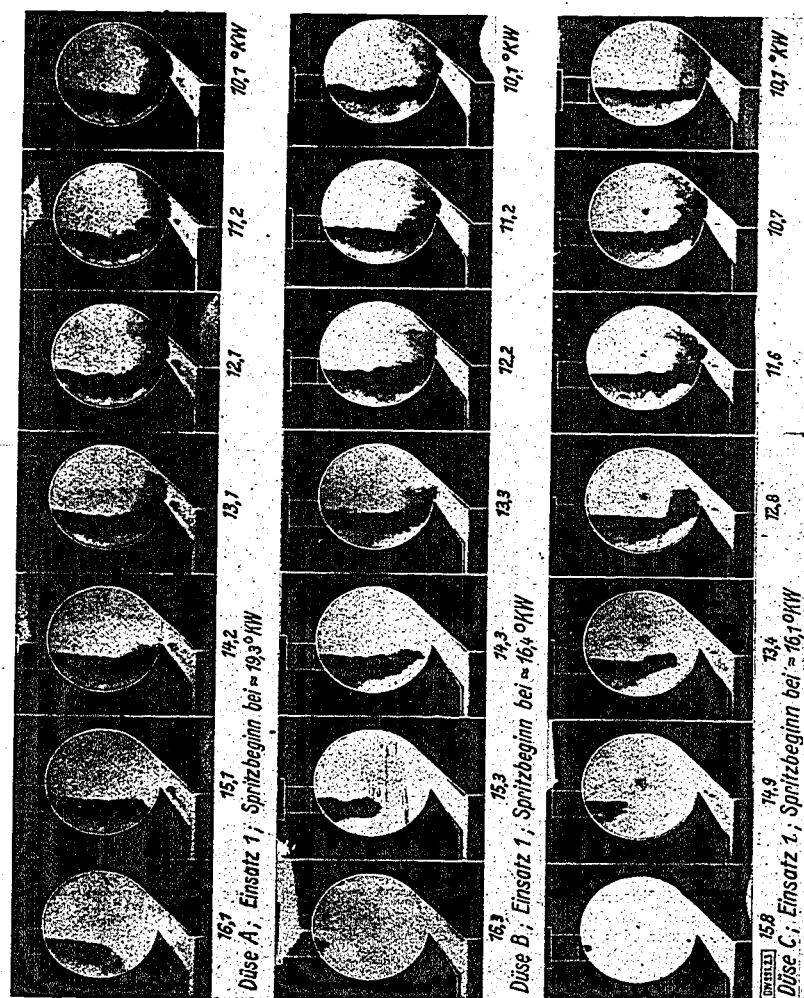


Bild 23. Strahlentwicklung der drei untersuchten Düsen bei Einspritzen in die Wirbelkammer mit Einsatz I (großer Überströmquerschnitt).

nahmen sind nicht mit der normalen optischen Anordnung, sondern leicht vergrößert auf Platten aufgenommen worden. Dabei waren nur zwei Kondensatoren parallel geschaltet an die Funkenstrecke angeschlossen, so daß bei der Auslösung nur ein einzelner Funke übersprang. Außerdem waren bei diesen Aufnahmen die Scheiben herausgenommen worden, so daß die Bilder das Ausstrahlen in die ruhende Atmosphäre ohne Verdichtung zeigen.

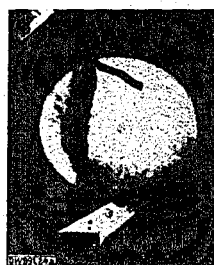
Zur Auswertung wurden die einzelnen Bilder einer Filmscheibe auf natürliche Größe vergrößert und zu fortlaufenden Reihen mit einem Bildabstand von 1 ° KW zusammengestellt. Um einen Anhaltspunkt für die Lage der Einspritzdüse zu haben, wurden die Umrisse der Kammer und der Sitz der Düse mit einer Schablone in die Bilder hineinkopiert. Dabei machte sich neben der geringen Tiefenschärfe die Perspektive der Kammer unangenehm bemerkbar. Die Tiefenschärfe beträgt nach v. Angerer [2]:

$$T = 2 \varepsilon V (1 + V) \cdot \text{Blendennummer.}$$

Darin bedeutet V die Verkleinerung des Bildes und ε den zulässigen Zerstreuungskreis eines Bildpunktes. Bei stärkerer Vergrößerung darf ε höchstens mit 0,1 angenommen werden. Die Blendennummer ist das Verhältnis der Brennweite zum freien Blendendurchmesser des Objektivs. Damit wird für die gegebenen Verhältnisse: $V = 3$ und Blendennummer = 4,5:

$$T = 2 \cdot 0,1 \cdot 3 \cdot (1 + 3) \cdot 4,5 = 10,8 \text{ mm.}$$

Bild 24. Form des Kraftstoffstrahls über dem weiten Überströmkanal (Einsatz 1) bei verschiedenen Düsen.



a) Düse A; 1,2 °KW vor o. T.



b) Düse B; 1,3 °KW vor o. T.



c) Düse C; 1,6 °KW vor o. T.

Da die Kammer eine Tiefe von 55 mm besitzt, werden die Randteile mit erheblicher Unschärfe abgebildet. Auf Bild 20 ist die Wirkung der Tiefenschärfe und der Perspektive schematisch dargestellt. Infolge der Perspektive wird der hintere, unscharfe Rand der Wirbelkammer als Bildbegrenzung abgebildet. Aus den geometrischen Verhältnissen ist für die Bildchen auf dem Film ein Abstand x des Randes der scharf eingestellten Düsenoberfläche vom Bildrand, $x = 0,27$ mm, errechnet worden. Bei dreifach linearer Vergrößerung wird dieser Abstand $x' = 0,81$ mm. Trotzdem wurde die Schablone auf den inneren Rand eingerichtet und die übrigen Abmessungen ungefähr nachkorrigiert, da in der Dunkelkammer ein Abschätzen des Abstandes bei den unscharfen Konturen und der teilweisen Überdeckung durch den Kraftstoffstrahl nicht möglich war. Die eingezeichneten Konturen geben somit nur einen Anhalt zur Beurteilung des Bildes und erheben auf Genauigkeit keinen Anspruch.

Die Wiederholbarkeit der Bilder leidet unter der Unzuverlässigkeit des Kraftstoffumschalters, durch die sowohl der Einspritzzeitpunkt wie auch das Einspritzgesetz verändert wird. Diese Unsicherheit tritt besonders zu Beginn der Einspritzung in Erscheinung, so daß trotz der stets gleichen Art der Strahlausbildung eine mengenmäßige Auswertung nicht durchführbar ist.

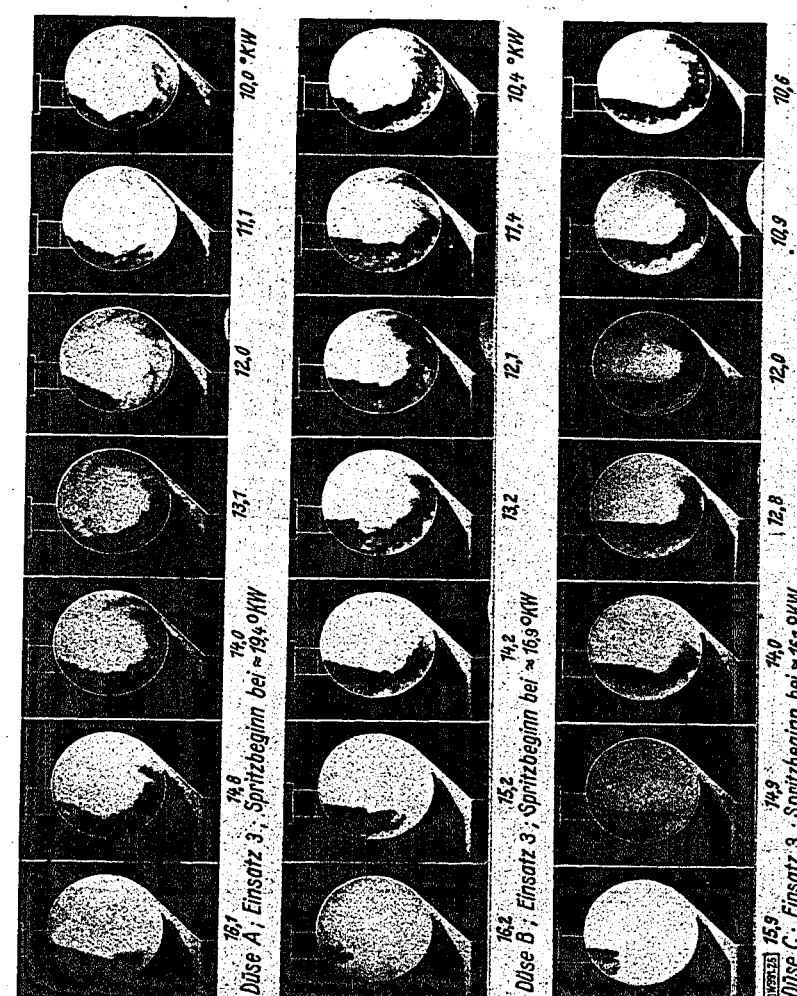


Bild 25. Strahlentwicklung der drei untersuchten Düsen bei Einspritz in die Wirbelkammer mit Einsatz 3 (enger Überströmkanal).

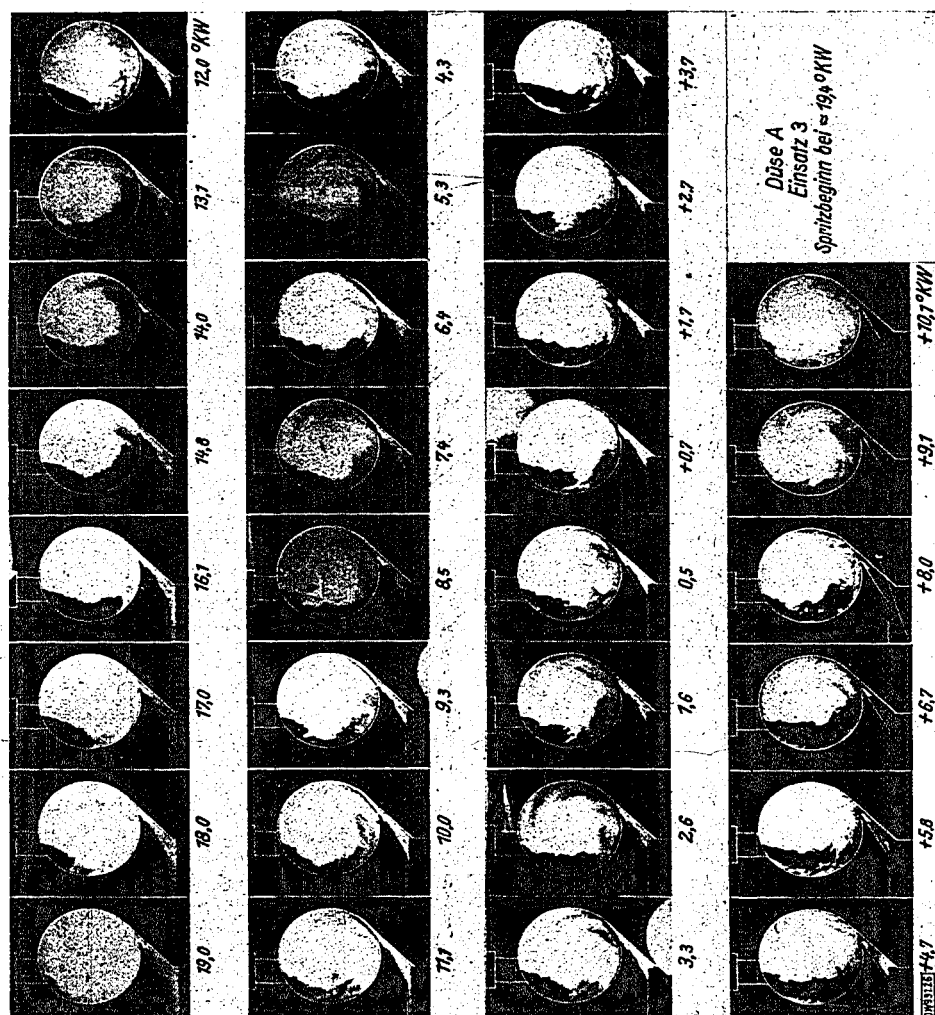


Bild 26. Einspritzverlauf für Düse A bei engem Überströmquerschnitt.

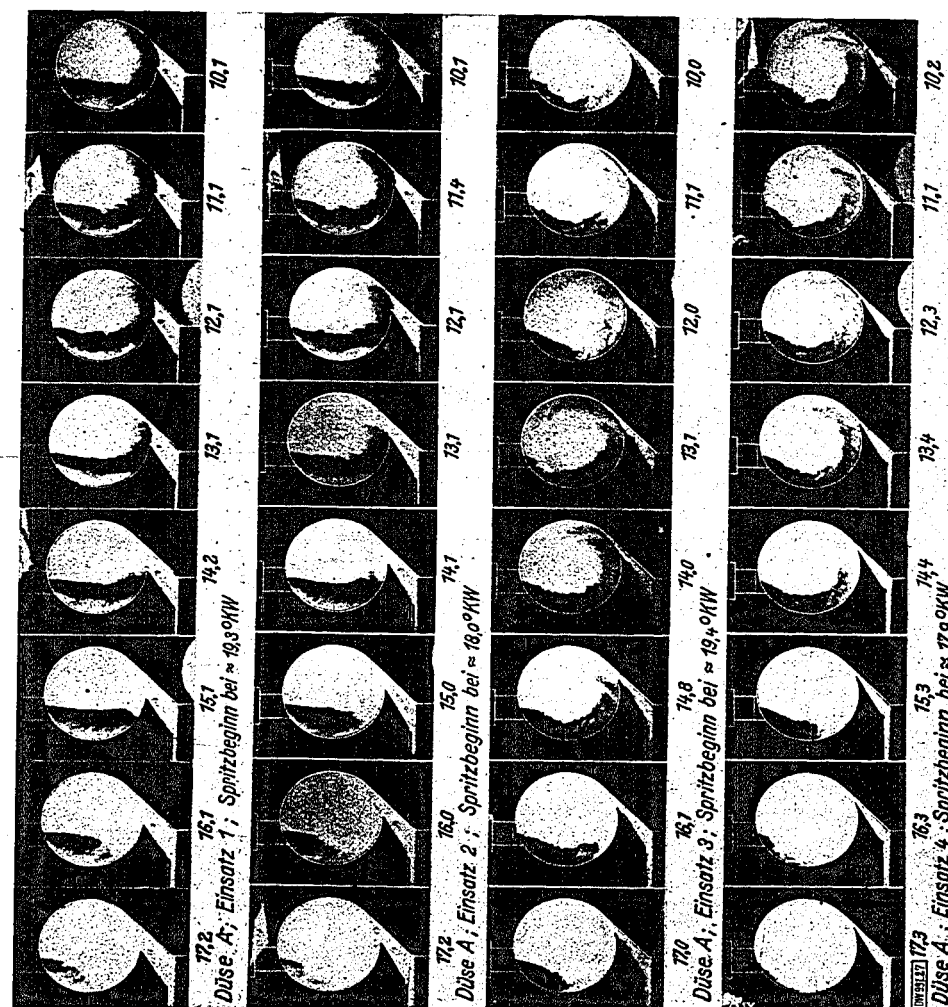


Bild 27. Strahlenentwicklung für Düse A bei verschiedenen Überströmquerschnitten.

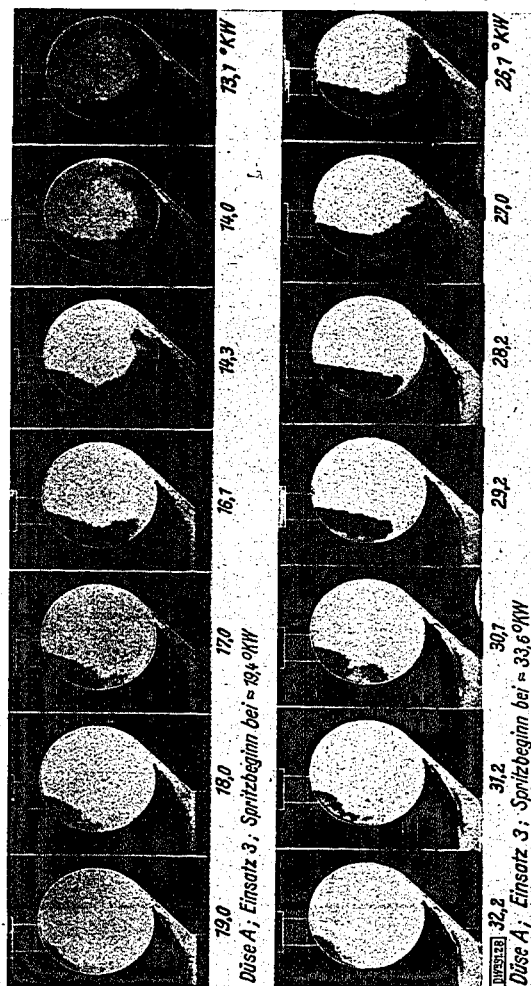


Bild 28. Einfluß des Spritzbeginns auf die Strahlenentwicklung.

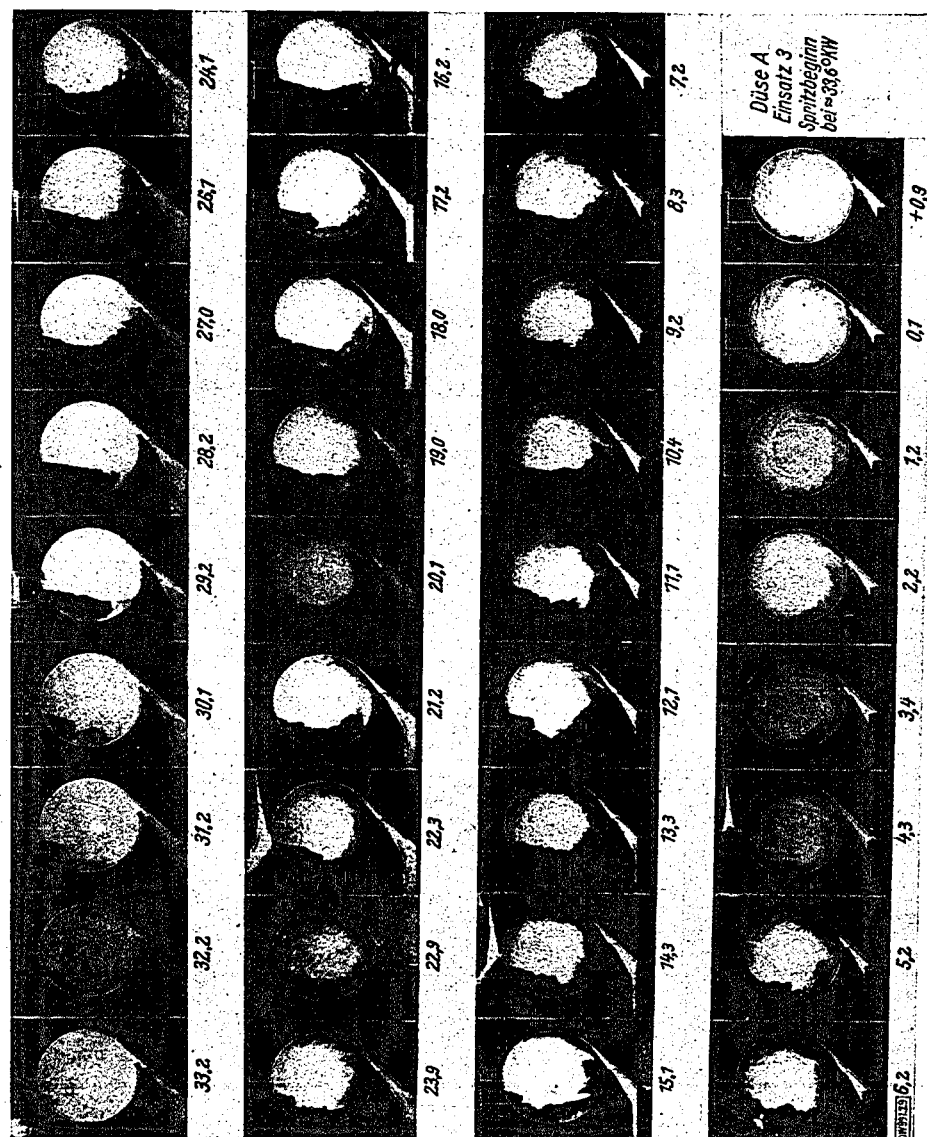


Bild 29. Einspritzverlauf für Düse A bei frühem Einspritzbeginn.

Abteilung
 Bibliothek
 der
 Deutschen Forschungsgemeinschaft
 Bonn

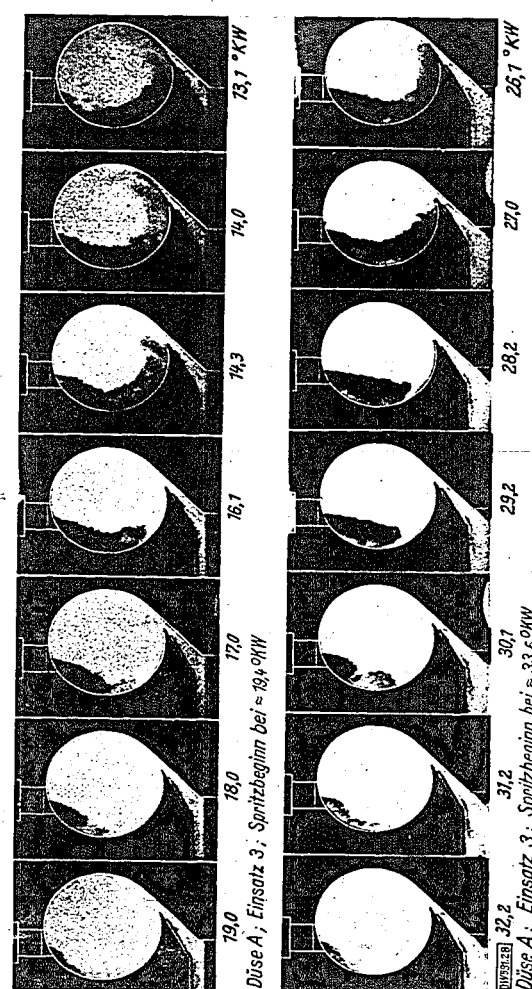


Bild 28. Einfluß des Spritzbeginns auf die Strahlentwicklung.

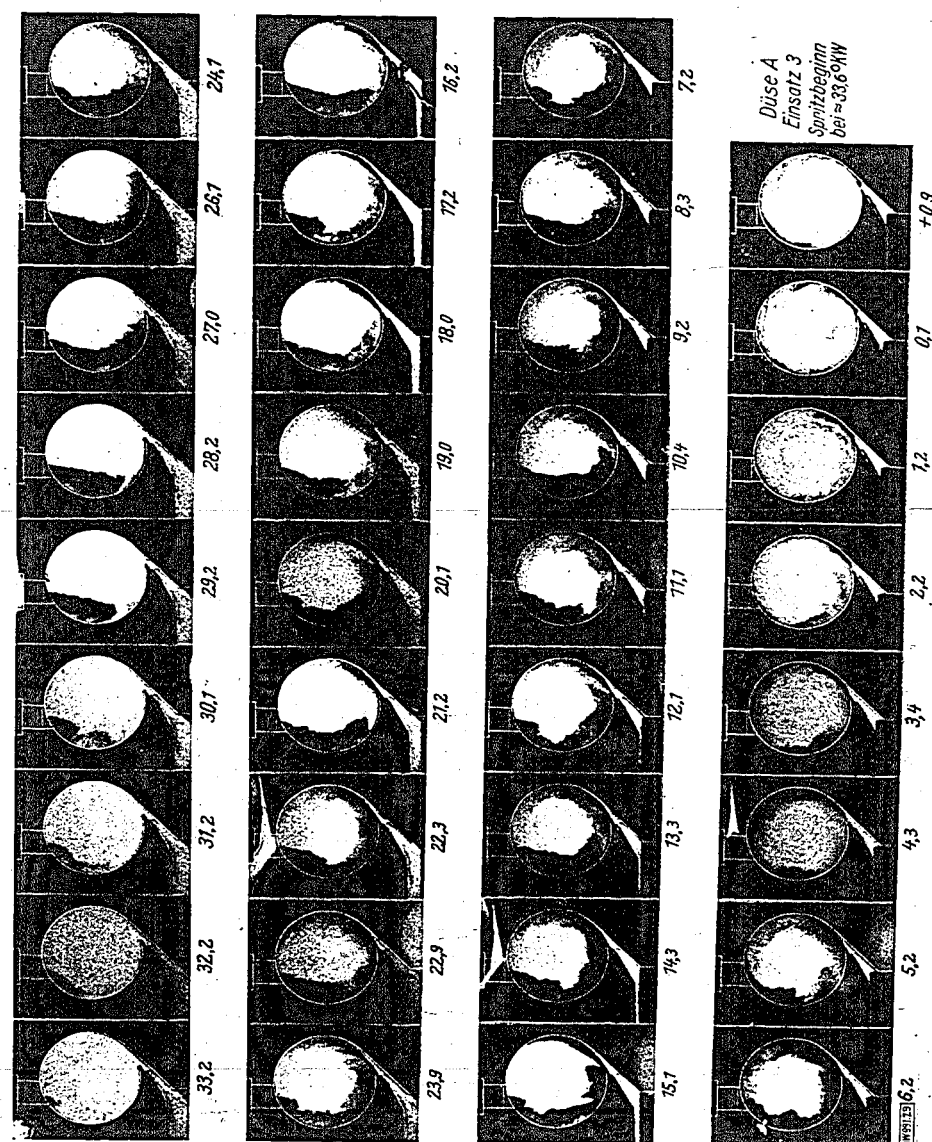


Bild 29. Einspritzverlauf für Düse A bei frühem Einspritzbeginn.

Bild 30. Ablenkung des Kraftstoffstrahls über dem weiten Oberströmquerschnitt (Einsatz 1) vor und nach o. T.



a) Düse A; 5,1 °KW vor o. T.



b) Düse A; 0,8 °KW vor o. T.



c) Düse A; 6,8 °KW vor o. T.

Bild 31. Ablenkung des Kraftstoffstrahls über dem engen Oberströmquerschnitt (Einsatz 3) vor und nach o. T.



a) Düse A; 5,5 °KW vor o. T.



b) Düse A; 1,4 °KW vor o. T.



c) Düse A; 6,0 °KW vor o. T.

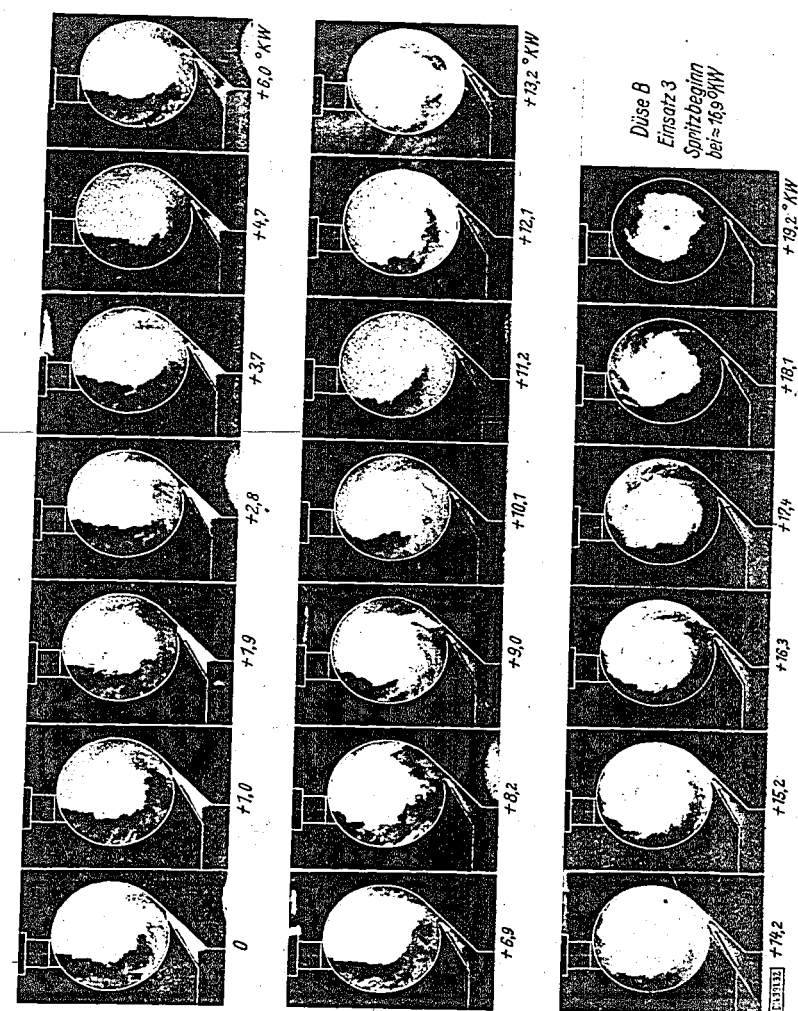


Bild 32. Verhalten des eingespritzten Kraftstoffes nach o. T.

42 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

In den folgenden Bildern sind Ausschnitte aus den aufgenommenen Bildreihen zusammengestellt. Um die Einzelbilder in erkennbarer Größe auf das Format 18×24 [cm] zu bekommen, mußte die Bildzahl beschränkt werden. In den meisten Fällen wird der Beginn der Spritzzeit gezeigt, da die Gemischbildung bis zum Zündzeitpunkt in erster Linie von Interesse ist.

Bild 21 zeigt zunächst noch einmal die drei untersuchten Düsen beim Abspritzen in die freie Atmosphäre in der Kammer ohne Scheiben. Der oben erläuterte unterschiedliche Spritzcharakter ist deutlich zu erkennen. Außerdem ist aus den Bildern zu ersehen, daß das Ausspritzen infolge der Schwingungen in der Kraftstoffleitung stoßweise erfolgt. Das Vorhandensein dieser Schwingungen geht auch aus der Kurve der Düsennadelerhebung, Bild 15, hervor.

Bild 22 zeigt das Einspritzen der drei Düsen in die Kammer ohne Einsatz, also mit sehr geringer Luftbewegung. Im Vergleich mit dem vorigen Bild ist hier der Einfluß der Verdichtung zu erkennen. Der Strahl wird zusammengedrückt und seine Eindringgeschwindigkeit verringert. Man erkennt, daß schon bei der hier sehr geringen Luftbewegung die Mantelteile des Strahles weggeblasen werden. Die folgenden Strahl-Einzelbilder ändern sich gegenüber den letzten im Bild gezeigten nicht mehr wesentlich. Die auf den ersten Einzelbildern der in Bild 22 gezeigten Reihen sichtbaren Streifen zwischen Kammer und Zylinder sind Fensterverschmutzungen durch Öl, die sich bei den Aufnahmen ohne Einsatz nicht ganz vermeiden lassen.

In Bild 23 ist das Einspritzen der drei Düsen in die Wirbelkammer mit Einsatz 1, also mit geringer Luftbewegung, gezeigt. Der Strahlmantel wird durch die Luft vom Strahlkern weg an die linke Kammerseite geblasen, während der Kern noch wenig beeinflusst wird. Am meisten wird der Kern bei der Düse A abgelenkt. Die beste Verteilung zeigt Düse B, daran erkenntlich, daß der Kraftstoff von der unteren Kammerwand nicht geschlossen über die Einmündung des Überströmkanals tritt, wie es bei den anderen Düsen der Fall ist.

Bild 24 zeigt diese Verhältnisse kurz vor dem oberen Totpunkt noch einmal in größerem Maßstab ohne Schablone. Die fein verteilten oder bereits verdampften Teile des eingespritzten Kraftstoffes sind als Schlieren im rechten Teil und in der Mitte der Kammer schwach zu erkennen.

Bild 25 zeigt dieselbe Zusammenstellung, wie Bild 23 für die Kammer mit Einsatz 3, also mit schon sehr kräftiger Wirbelung. Auch die Strahlkerne werden hier sichtbar aus ihrer Richtung abgelenkt. Am stärksten geschieht dies bei Düse A, bei der fast der gesamte Strahl an die Kammerwand gedrückt wird. Bei Düse B werden erhebliche Teile aus dem aufgelockerten Strahl herausgeblasen, während bei Düse C wieder nur die Mantelteile von der Luftströmung mitgenommen werden und der geschlossene Strahlkern nur wenig aus seiner Richtung gedrückt wird. Bei allen drei Düsen tritt hier ein geschlossener Strahl von der unteren Kammerwand über die Kanalmündung und fließt an der rechten Kammerwand in die Höhe. Durch den Kammerwirbel werden demnach die schwereren Kraftstoffteile an die Wand gedrückt, die feiner verteilten und verdampften Teile rotieren mehr im Kammerinneren, während die Mitte der Kammer mit ihrer kleinen Rotationsgeschwindigkeit vom Kraftstoff frei bleibt, wie an den folgenden Aufnahmen noch deutlicher gezeigt wird und sich auch an den Verbrennungsaufnahmen, Bild 33 und 34, bestätigt.

In Bild 26 ist die vollständige Reihe von Einspritzbeginn bis über Einspritzende hinaus für die Düse A und den Einsatz 3 gezeigt. Es ist zu erkennen, daß sich die Verhältnisse auf den späteren Bildern im wesentlichen nicht mehr ändern. Mit Annäherung an den oberen Totpunkt wird die Wirbelenergie geringer und vermag den Strahl nicht mehr so stark abzulenken; Wirbelung bleibt aber bis zum letzten Bilde erhalten, wodurch die theoretischen Betrachtungen auf S. 8 und Bild 14 bestätigt werden dürften. Auf den letzten Bildern erkennt man noch immer den Wirbel der Kraftstoffdampfschlieren mit dem wiederum kraftstofffreien Mittelteil der Kammer.

In Bild 27 ist der Einfluß verschieden starker Luftwirbelung, hervorgerufen durch verschieden weite Überströmquerschnitte, gezeigt. Bei Einsatz 2 ist der von der Randzone weggeblasene Kraftstoffanteil schon etwas größer als bei Einsatz 1; sonst ist der Unterschied nicht wesentlich. Bei Einsatz 3 ist bereits der ganze Strahl an die Wand gedrückt, und mit Einsatz 4 ist der Unterschied gegenüber Einsatz 3 wieder sehr gering. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zur Größe der theoretisch ermittelten Energiewerte (Bild 13), nach denen sich mit Einsatz 4 eine vielfach größere Wirbelenergie ergeben müßte. Dabei ist zu bedenken, daß die theoretischen Energiewerte unter Annahme gleicher Einschnürungs- und Energieverluste ($\mu = 0,6$) errechnet worden sind. Nach den Ergebnissen der Aufnahmen läßt sich darauf schließen, daß bei engeren Überströmkanälen die Energieverluste so stark anwachsen, daß die Wirbelungsenergie in der Kammer praktisch nicht mehr wesentlich erhöht wird. Dieses Ergebnis ist für die Ausbildung der Wirbelkammer insofern von besonderem Interesse, als nach neueren Untersuchungen von Ullmann [22] die Überschiebverluste bei unterteilten Brennräumen mit engen Überströmkanälen sehr erhebliche Werte annehmen. Im Interesse der Wirt-

schaftlichkeit des motorischen Arbeitsverfahrens wäre hier zu prüfen, mit welchem geringsten Energieaufwand die gewünschte Wirkung erzielt werden kann.

In Bild 28 sind zwei Reihen mit derselben Düse und demselben Kammereinsatz, aber mit verschiedenem Spritzbeginn zusammengestellt. Bei früherem Spritzbeginn hat die Wirbelungsenergie noch nicht den Wert erreicht, um den Strahl so stark abzulenken, wie bei späterem Spritzbeginn, obwohl die Änderung der Wirbelungsenergie bei etwa 30° KW vor o. T. bereits nahezu ihren Höchstwert erreicht haben müßte. Das läßt wiederum in Übereinstimmung mit Bild 14 auf den dort dargestellten Verlauf der Wirbelungsenergie in der Kammer schließen.

In Bild 29 ist die Strahlentwicklung über den ganzen Einspritzbereich bei früherem Einspritzbeginn und sonst denselben Verhältnissen wie bei Bild 26 gezeigt. Auf den letzten Bildern dieser Reihe ist besonders deutlich der Wirbelring um die kraftstofffreie Kammermitte zu erkennen. Außerdem zeigt sich hier, daß der gesamte eingespritzte und nicht fein verteilte oder verdampfte Kraftstoff selbst nach Beendigung der Einspritzung noch im kompakten Strahl an den Wänden entlang kreist.

In Bild 30 und 31 sind einige Einzelbilder mit Einsatz 1 und 3 zu verschiedenen Zeitpunkten der Einspritzung gezeigt, etwa 6° vor o. T., 1° nach o. T. und 6° nach o. T. Wenn auch Aufnahmen nach o. T. für die Gemischbildung im Motor nicht von unmittelbarem Interesse sind, da inzwischen die Zündung erfolgt sein wird, geben sie doch ein Bild der Strömungsverhältnisse. Auf den Bildern soll vor allem das Verhalten des Kraftstoffes am Ende der Lufteströmung in die Kammer gezeigt werden. Bei 6° KW vor o. T. wird noch Luft in die Kammer übergeschoben. Auf den entsprechenden Bildern 30 a und 31 a ist zu sehen, wie die Luft von unten gegen den vom Kammerboden abspritzenden Strahl drückt und die leichteren Teile nach der Kammermitte hin verweht. Bei Einsatz 1 wird der Strahl hierbei ziemlich aufgelockert, während er bei Einsatz 3 noch fast geschlossen auf die gegenüberliegende Wand aufrifft. Bei den Bildern 30 b und 31 b, etwa 1° KW nach o. T., hat das Überschieben von Luft in die Kammer aufgehört. Der von der Schneide zwischen Kammer und Überströmkanal abspritzende Kraftstoff prallt auf die gegenüberliegende Wand auf und verteilt sich entsprechend dem Aufprallwinkel nach beiden Seiten. Bei den letzten Bildern 30 c und 31 c, etwa 6° KW nach o. T., hat das Aussaugen aus der Kammer bereits begonnen und der Strahl wird zum größeren Teil in den Überströmkanal hineingesaugt. Der Wirbel in der Kammer besteht jedoch noch weiter, wobei durch das Zusammenwirken der Wirbelung mit der Saugkraft des Kolbens die Kraftstoffnebel von der Wand weg etwas mehr zur Kammermitte hin getragen werden.

Noch weiter kann dieser Vorgang vom oberen Totpunkt aus auf Bild 32 verfolgt werden. Ungefähr von $+4,7^\circ$ KW ab wird der Kraftstoff in den Überströmkanal hineingesaugt. Bei etwa 10° KW nach o. T. ist die Einspritzung beendet. Das Weiterbestehen der Wirbelung ist noch immer deutlich sichtbar. Durch das Absaugen wird aber der Kraftstoff immer stärker von der Wand abgelöst, so daß zuletzt ein undurchsichtiger Nebel in breiter Zone von der Wand zur Kammermitte hin rotiert.

An Hand der Bilder 30 bis 32 soll noch allgemein auf einige besondere Erscheinungen bei den Aufnahmen hingewiesen werden. Die dunklen Punkte, die bei einigen Aufnahmen in Kammermitte zu sehen sind, rühren von Ölablagerungen auf den die Kammer abdeckenden Glasscheiben her. Die Öldämpfe steigen vor allem am Aufsatzkolben vorbei seitlich an den Scheiben hoch. Bei der in der Kammer bestehenden Wirbelbewegung konzentrieren sich diese schweren Bestandteile nicht, wie man erwarten sollte, an den Rändern, sondern infolge des Einflusses der Wandreibung an den Scheiben in der Mitte.

Ferner besteht eine Unschönheit der Aufnahmen darin, daß die zwischen Scheiben und Einsatz eingelegte Dichtung gelegentlich verschoben ist und bei einigen Aufnahmen in den Überströmkanal hineinragt.

Die Aufnahmen mit Einspritzung von halb rechts und halb links gegenüber der senkrechten sind mit der alten Anordnung der Belichtungsfunktensteuerung gemacht, daher verschwommen und mit den neueren Bildern nur schwer zu vergleichen. Auf die Überlegenheit einer Einspritzrichtung kann aus den vorhandenen Strahlaufnahmen nicht geschlossen werden, obwohl Versuche am laufenden Ricardo-Motor eine Überlegenheit der senkrechten Einspritzung gegenüber der von halb rechts ergeben haben. Hierzu könnten vielleicht Versuche mit Verbrennung Aufklärung bringen, die zeigen, an welcher Stelle der Kammer die Zündung beginnt und in welcher Richtung die Verbrennung fortschreitet.

43 Verbrennungsaufnahmen

Da dem Maschinenlaboratorium von der Zeiß-Ikon-AG. kurzzeitig eine Zeitdehner-Schmalfilmkamera zur Verfügung gestellt worden war, wurden mit ihr einige Aufnahmen der Verbrennung

in der Wirbelkammer gemacht. Diese Aufnahmen gehören nicht zum eigentlichen Versuchsplan und tragen nur den Charakter tastender Vorversuche. Es sollen daher nur einige Bilder vom Beginn der Verbrennung gezeigt werden, die als Bestätigung der Gemischbildungsuntersuchungen dienen können.

Der Zeiß-Ikon-Zeitdehner arbeitet mit rotierenden Spiegeln zur Unterteilung der Einzelbilder und gleichzeitig zum Ausgleich der Filmbewegung. Mit der benutzten Ausführung für 16-mm-Schmalfilm können bis zu 3000 Bilder in der Sekunde aufgenommen werden. Auf den Aufbau und die Arbeitsweise der Kamera soll hier nicht weiter eingegangen werden. Für die Aufnahmen war an Stelle der Funkenstrecke eine Bogenlampe gesetzt worden, deren Licht durch eine Mattscheibe soweit abgedeckt war, daß der Kraftstoffstrahl gerade noch als Schatten zu erkennen



Bild 33.

Verbrennungsaufnahme bei Zündbeginn.

Düse A, Einsatz 2 (weiter Oberströmungsquerschnitt).

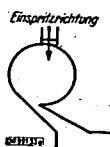
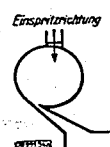


Bild 34.

Verbrennungsaufnahme bei Zündbeginn.

Düse A, Einsatz 4 (enger Oberströmungsquerschnitt).



war, das Eigenlicht der Verbrennung aber nicht überstrahlt wurde. Bei dem behelfsmäßigen Aufbau war es nicht möglich, eine Totpunktmarke auf den Film zu bringen, so daß der Zeitpunkt der einzelnen Bilder nur geschätzt werden konnte. Nach den gleichzeitig aufgenommenen Druckdiagrammen setzte die Zündung etwa 7° KW vor o. T. ein, so daß die gezeigten Bilder diesem Zeitpunkt entsprechen dürften.

Die Bilder 33 und 34 geben eine Bestätigung dafür, daß sich in der Kammermitte kein Kraftstoff befindet. Man erkennt deutlich, daß zunächst nur der Ring mit dem fein verteilten und verdampften Kraftstoff zündet, während die Wandzone mit dem nicht zerstäubten, flüssigen Kraftstoff und die Kammermitte an der Verbrennung nicht teilnehmen. Auch auf den zeitlich letzten Bildern, bei denen die Verbrennung bereits in den Oberströmkanal fortgeschritten ist, ist die verbrennungsfreie Kammermitte noch zu erkennen.

Demnach wird die in die Kammer übergeschobene Luft nicht restlos zur Verbrennung herangezogen. Ein großer Teil des eingespritzten Kraftstoffes wird erst beim Abwärtsgang des Kolbens in den Zylinder gesaugt werden, wie auf dem vorhergehenden Bild 32 gezeigt ist, und dort Anlaß zum Nachbrennen geben. Zur Klärung dieser Vorgänge dürften weitere Verbrennungsuntersuchungen an der Anlage führen, von denen außerdem noch weitergehende Erkenntnisse über den Ablauf der Verbrennung erwartet werden dürfen.

5 Zusammenfassung

Die hier entwickelte Versuchsanlage gestattet, auf optischem Wege die Ausbildung des Kraftstoffstrahls in einer Wirbelkammer zu beobachten. Die Untersuchungen beschränken sich zunächst auf die Vorgänge ohne Verbrennung. Mit Hilfe einer Funkenbelichtungsanlage werden auf einer umlaufenden Filmscheibe Bilder der Vorgänge in der Wirbelkammer mit einer Frequenz von 3000 Bildern je Sekunde aufgenommen. Über die Strömungsverhältnisse in der Wirbelkammer geben theoretische Betrachtungen Aufschluß. Die Versuchsergebnisse sind in Reihen zusammengestellt und erläutert.

Untersucht werden drei Düsen von verschiedener Abspritzcharakteristik sowie mehrere Strömungsgeschwindigkeiten, die durch Verengung des Überströmkanals durch verschiedene Einsätze erzeugt werden. Dabei zeigt sich, daß bei dem engsten Kanal der Kraftstoffstrahl gegenüber dem vorhergehenden nicht mehr stärker beeinflusst wird. Bei den engeren Kanälen wird der Kraftstoffstrahl durch die Wirbelung an die Wand gedrückt, während die Kammermitte von Kraftstoff frei bleibt. Einige Verbrennungsaufnahmen bestätigen dieses Ergebnis. Durch weitere Untersuchungen müssen die Versuche nach der Verbrennungsseite hin ergänzt werden.

6 Schriftumsverzeichnis

- [1] Alcock, J. F.: Air swirl in oil engines — Engineering Bd. 138 (1934) S. 694/95, 720/21 und Autom. Engr. Bd. 25 (1935) S. 49/54.
- [2] v. Angerer, E.: Wissenschaftliche Photographie — Leipzig: Akad. Verlagsges. 1939.
- [3] Dreyhaupt, F.: Vorgänge im Verbrennungsraum beim Lanova-Dieselmotor — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 9 (1938) S. 1/13.
- [4] Frey: Verbrennungsraum und Einspritzdüse des „Linke“-Dieselschnellläufers — VDI-Sonderheft Dieselmotoren V, Berlin: VDI-Verlag 1932, S. 116/17.
- [5] Hoffelder, O.: Zur Strahlzerstreuung bei Dieselmotoren — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 3 (1932) S. 229/40.
- [6] Hoffelder, O.: Der Einspritzvorgang bei Dieselmotoren — Z. VDI Bd. 76 (1932) S. 1241/44.
- [7] Lindner, W.: Mehrfachfunkenaufnahmen von Explosionsvorgängen nach der Toeplerschen Schlierenmethode — VDI-Forsch.-Heft 326, Berlin: VDI-Verlag 1930.
- [8] Mann, E.: Untersuchung des Verbrennungsverfahrens des Ricardo-Komet-Dieselmotors — Dipl.-Arb. am Maschinenlaboratorium der T. H. Dresden 1936.
- [9] Mehlitz, H.: Die Vorkammergröße und ihr Einfluß auf das Arbeitsverhalten der Vorkammer-Dieselmotoren — Motorwagen (jetzt Autom.-techn. Z.) Bd. 32 (1929) S. 723/25, 783/85.
- [10] Meurer, S.: Neuere Mittel zur Untersuchung der Vorgänge im Motor — Berichtsheft zur 74. VDI-Hauptversammlung Darmstadt 1936, Berlin: VDI-Verlag 1936, S. 242/49.
- [11] Meurer, S.: Zur Messung schnell veränderlicher Drücke und Temperaturen — Berichtswerk Prüfen und Messen, Berlin: VDI-Verlag 1937, S. 40/42.
- [12] Neumann, K.: Untersuchungen an der Dieselmotorschnecke. Die Vorkammermaschine — VDI-Forsch.-Heft 309, Berlin: VDI-Verlag 1928.
- [13] Neumann, K.: Untersuchungen an der Dieselmotorschnecke. Strahleinspritzmaschinen mit unterteiltem Verdichtungsraum und mit Wärmespeicher — VDI-Sonderheft Dieselmotoren V, Berlin: VDI-Verlag 1932, S. 111/15.
- [14] Oschatz, W.: Düsen- und Strahluntersuchungen — Diss. T. H. Dresden 1940.
- [15] Pischinger, A. und O. Cordier: Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor. — In: Die Verbrennungskraftmaschine H. 7, Wien-Berlin: Springer-Verlag 1939.
- [16] Rothrock, A. M. und R. C. Spencer: Effect of moderate air flow on the distribution of fuel sprays after injection cutoff — Nat. Advis. Com. Aeron. Rep. 483, Washington 1934.
- [17] Rothrock, A. M. und C. D. Waldron: Fuel spray and flame formation in a compression-ignition engine employing air flow — Nat. Advis. Com. Aeron. Rep. 588, Washington 1937 (siehe auch [24]).
- [18] Rothrock, A. M.: A visual study in a displacer-piston compression-ignition engine — S. A. E. J. Bd. 40 (1937) S. 22/27.
- [19] Schlaefke, K.: Vorgänge beim Verdichtungsstadium von Vorkammer-Dieselmotoren — VDI-Sonderheft Dieselmotoren V, Berlin: VDI-Verlag 1932, S. 90/93.
- [20] Schulz, F.: Der kompressorlose Betrieb von Dieselmotoren — VDI-Sonderheft Dieselmotoren II, Berlin: VDI-Verlag 1926, S. 89/93.
- [21] Steuding, H.: Messung mechanischer Schwingungen — Berlin: VDI-Verlag 1928.
- [22] Ullmann, K.: Die mechanischen Verluste des schnelllaufenden Dieselmotors und ihre Ermittlung mit dem Schleppversuch — Dtsch. Kraftf.-Forsch. H. 34, Berlin: VDI-Verlag 1939.
- [23] Zinner, K.: Stand der Erkenntnis über die Gemischbildung im Otto- und Dieselmotor — Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 141/47.
- [24] Zinner, K.: Einfluß der Luftbewegung auf die Verbrennung im Dieselmotor — Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 1536.

001100

Neue Hefte

Deutsche Kraftfahrtforschung im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

- Heft 61 **Der Spülvorgang auf Grund einer neuen Auffassung der Expansionsströmung.** Von F. Schultz-Grunow VDI und K. Wieghardt. DIN A 4, 15 Seiten mit 15 Bildern. 1941. Brosch. 1,50 RM.
- Heft 62 **Aufladevorgang von Viertakt Dieselmotoren.** Der Spülvorgang. Von W. Riedel. DIN A 4, 14 Seiten mit 32 Bildern. 1941. Brosch. 1,30 RM.
- Heft 63 **Zündverzug und Bewertung des Kraftstoffes.** Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für Diesel- und Ottokraftstoffe. Von H. Ernst VDI. Zündverzugs-messungen an Diesel- und Ottokraftstoffen. Von O. Widmaier. DIN A 4, 36 Seiten mit 44 Bildern und 4 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 3,40 RM.
- Heft 64 **Entstehung und Frequenzzusammensetzung der Geräusche von Kraftwagengetrieben.** Von H. Glaubitz VDI und K. Gösele. DIN A 4, 37 Seiten mit 40 Bildern und 1 Zahlen-tafel. 1942. Brosch. 3,55 RM.
- Heft 65 **Schleifvorgang und Schleifflüssigkeit.** Von H. Opitz VDI und W. Vits VDI. DIN A 4, 21 Seiten mit 34 Bildern (davon 7 Anaglyphenbilder mit Betrachtungsbrille) sowie 4 Zahlen-tafeln. 1942. Brosch. 2,35 RM.
- Heft 66 **Nachprüfung der Luftwiderstandsmessungen an Fahrzeugmodellen durch Auslaufversuche mit den Fahrzeugen.** Von W. Weiß VDE und E. Sawatzki. DIN A 4, 16 Seiten mit 35 Bildern und 4 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 1,50 RM.
- Heft 67 **Entwicklungsarbeiten an luftgekühlten Kraftwagenmotoren und ihren Kühlgebläsen.** Mit folgenden Beiträgen: Erweiterung der Gestaltungsgrundlagen für luftgekühlte Kraftwagen-motoren. Von H. Ernst VDI und K. Schäfer. Kühlgebläse für luftgekühlte Kraftwagen-motoren. Von B. Eckert VDI/ATG. DIN A 4, 40 Seiten mit 50 Bildern und 3 Zahlentafeln. 1942. Brosch. 3,75 RM.
- Heft 68 **Wasserstoff als Motortreibmittel.** Von M. Oehmichen VDI. DIN A 4, 32 Seiten mit 45 Bil- dern und 2 Zahlentafeln. 1942. Brosch. 3,— RM.
- Heft 69 **Zahnradgeräusche.** 1. Teil. Schalldruck und Frequenzspektrum der Reibgeräusche an Zahn- flanken. Von H. Harz VDI. DIN A 4, 51 Seiten mit 35 Bildern und 5 Zahlentafeln. 1942. Brosch. 4,80 RM.
- Heft 70 **Dynamische Triebwerksbeanspruchungen von Kraftfahrzeugen, insbesondere bei Kupplungs- betätigung.** Von M. Ulrich VDI und H. Glaubitz VDI. DIN A 4, 31 Seiten mit 47 Bil- dern. 1942. Brosch. 3,— RM.
- Heft 71 **Die Verformungs- und Beanspruchungsverhältnisse an Bauelementen des Fahrzeugbaues.** Von A. Thum VDI und O. Svenson VDI. DIN A 4, 38 S. mit 58 Bildern. 1942. Brosch. 3,55 RM.
- Heft 72 **Sparstoffarme Einsatz- und Vergütungsstähle.** Mit folgenden Beiträgen: Chrom-Silizium- Vergütungsstähle. Von W. Eilender VDI, H. Arend und H. E. Barth. Chrom-Mangan- Einsatzstähle. Von W. Eilender VDI, H. Arend und K. Feldmann. DIN A 4, 14 Seiten mit 14 Bildern und 6 Zahlentafeln. 1942. Brosch. 1,30 RM.
- Heft 73 **Beanspruchungsmechanismus und Gestaltfestigkeit von Nahensitzen.** Von A. Thum VDI. DIN A 4, 40 Seiten mit 41 Bildern, 11 Zahlentafeln und 4 Tafeln. 1942. Brosch. 3,75 RM.
- Heft 74 **Untersuchungen an Saugrohren.** 1. Teil: Rechnerische und graphische Behandlung der Strö- mungsvorgänge in Saugrohren. Von G. Reyl. DIN A 4, 75 Seiten mit 61 Bildern. 1943. Brosch. 7,— RM.
- Heft 75 **Dynamische Vorgänge bei klopfender Verbrennung.** Von A. Köchling. DIN A 4, 40 Seiten mit 39 Bildern. 1943. Brosch. 3,75 RM.
- Heft 76 **Einfluß der Luftbewegung auf die Ausbildung des Kraftstoffstrahles in der Wirbelkammer.** Von K. F. Säuberlich VDI. DIN A 4, 29 Seiten mit 34 Bildern. 1943. Brosch. 2,70 RM.

Bezug durch jede Buchhandlung!



VDI-VERLAG GMBH · BERLIN NW 7

(D.)

REPORTS FROM THE
ERPROBUNGSSTELLE, RECHLIN.

2105 ITEMS Nos.

102 THRU 106.

(D.)

REPORTS FROM THE
ERPROBUNGSTELLE, RECHLIN.

C10S ITEMS Nos.

102 THRU 106.

Rechlin E 3 c
Erpr. Nr. 2563

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmotoren.

Teilbericht 16
Blatt

102

23. 11.

001101

Rechlin, den 18.11.1941

LM

Zusammenfassung

Als Einheitsmotor für die Cetanzahlbestimmung von Dieselmotoren wird der I.G. Prüfdiesel, als Einheitsprüfverfahren das Zündverzugsverfahren bei annähernd gleichem Zündverzug empfohlen.

Als Zündverzugs-Messapparatur sind, sofern nur Cetanzahlbestimmungen durchgeführt werden sollen, die Trägheitsindikatoren nach Dr. Neumann (Rhenania-Ossag) geeignet. Für eingehendere Untersuchungen über den Zünd- und Verbrennungsvorgang kann die von der I.G. bisher verwendete Apparatur (Quarzgeber und Braunsche Röhre) zusätzlich benutzt werden.

Soweit eine Neubeschaffung des I.G.- Prüfdiesels z.Z. noch nicht möglich ist, sollen Prüfstellen die bei ihnen vorhandenen CFR-, IG-Dieselmotoren oder HWA-Motoren mit dem Dr. Neumannschen Indikatoren aus-rüsten.

Bearbeiter:

Lange
Referent

Gelesen:

Leiter der
Erprobungsstelle

Verteiler:

- 1 x GL/A - M II (GL 5 II)
- 1 x Oberkdo. des Heeres, Wa Prüf 6
- 1 x E-Stelle Travemünde, E 3 L
- 1 x DVL, Institut für Betriebsstoffforschung
- 1 x FKFS, Stuttgart-Untertürkheim
- 1 x I.G., Ludwigshafen, Techn. Prüfstand Oppau
- 1 x Rhenania-Ossag, ZMP Harburg
- 1 x Intava, Hamburg
- 1 x Nera, Misburg (Hannover)
- 1 x Ruhrbenzin A.G., Oberhausen-Holten (Dr. Schaub)
- 1 x JUMO, Dessau
- 1 x K.d.E.
- 1 x E 3
- 1 x E 3 c
- 3 x Reserve

Dieser Bericht enthält 21 Blätter

Bearbeitet:	Geprüft:	Geprüft:	Gelesen:
E3cl: Lange	E3c: <i>Dr. G. Neumann</i>	E3: <i>LM</i>	<i>LM</i>
Gruppe	Bearbeiter	Tag	

Rechlin E 3 c
Erpr,Nr. 2363

Vorfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselkraftstoffen.

Teilbericht 16

Blatt 2

A. A u f g a b e

001102

Es ist durch Vergleichsversuche festzustellen, welche Prüfmethode
für Cetanzahlbestimmungen von Dieselkraftstoffen im Bereich der Luft-
waffe vorgeschrieben werden sollen.

B. E r g e b n i s

Es wird empfohlen, für Cetanzahlbestimmungen von Dieselkraftstoffen
das Zündverzugsverfahren und zwar ^{mit} annähernd konstantem Zündverzug
als verbindlich zu erklären. Alle anderen geprüften Verfahren: der
Dieselindex nach ASTM, das Dichteverfahren nach Marder, das Verfahren
nach Dumanois im CFR-Vergasermotor und das Ansprungsverfahren des Heeres-
waffenamtes sind zu ungenau oder führen zu einer falschen Kraftstoff-
bewertung.

Motor und Apparate für die Messung des Zündverzuges sind beim Zünd-
verzugsverfahren (im Gegensatz zur Oktanzahlbestimmung) von verhält-
nismäßig untergeordneter Bedeutung. Der FKFS-Motor, der I.G.-Prüfdie-
sel, der CFR-Diesel und sogar der mit einer ganz anderen Luftüber-
schußzahl und lediglich mit Drosselung arbeitende HWA-Diesel ergeben
eine recht gute Übereinstimmung der Versuchswerte. Ebenso erscheinen
mit einer Ausnahme alle auf den verschiedensten Prinzipien beruhenden
Geräte für die Zündverzugsmessung geeignet.

Um die Ergebnisse der verschiedenen Prüfstellen noch einheitlicher zu
gestalten, wird für die Betriebsstoff-Laboratorien der Luftwaffe und
der mit ihr zusammenarbeitenden Industrie folgende Regelung vorge-
schlagen:

1.) Bei Neuanschaffung ist der I.G.-Prüfdiesel zu erstellen. Für ein-
fache Prüfstellen, die nur Cetanzahlbestimmungen durchzuführen haben,
ist er mit den von Dr. Neumann (Rhenania-Ossag) entwickelten Träg-
heitsindikatoren auszurüsten. Prüfstellen, die grundlegende Versuchs-
arbeiten durchzuführen haben und über entsprechendes Personal verfü-
gen, erhalten zusätzlich die bisherige I.G.-Normalapparatur (Quarzge-
ber und Braunsche Röhre). Beide Geräte können gleichzeitig am I.G.-
Prüfdiesel angebracht werden.

I.G.-

2.) Die bei Prüfstellen bereits vorhandenen HWA- und CFR-Diesel-Mo-
toren werden mit Trägheitsindikatoren nach Dr. Neumann ausgerüstet.

Gruppe

Bearbeiter

Tag

5000 E. 43

Fabrikant Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c
Erpr. Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieseldkraftstoffen.

Teilbericht 16

Blatt 3.

Weitere Maßnahmen.

- 1.) Nach Ausrüstung der Prüfstellen mit den Trägheitsindikatoren ist ein weiterer Ringversuch beabsichtigt.
- 2.) Die Trägheitsindikatoren werden z.Z. in Rechlin auf ihre Verwendbarkeit auch für die Bestimmung sehr hoher Cetanzahlen geprüft.

C. Versuchsdurchführung

Für die Untersuchung wurden die auf Tafel 1 zusammengestellten Dieseldkraftstoffe verwandt. Diese umfassen Naturgasöle, Crackprodukte, Braunkohlenteeröle und synthetische Stoffe mit Cetanzahlen zwischen 35 und 85. An den Versuchen nahmen folgende Stellen teil:

- 1.) DVL, Institut für Betriebsstoffforschung,
Berlin-Adlershof.
- 2.) Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS),
Stuttgart - Untertürkheim.
- 3.) I.G. Farbenindustrie A.G., Techn. Prüfstand Oppau,
Ludwigshafen am Rhein.
- 4.) Intava, Hamburg.
- 5.) Rhenania-Osmag Mineralölwerke A.G., ZMP Harburg,
Hamburg - Harburg.
- 6.) Gewerkschaft Neue Erdöl Raffinerie (Nerag),
Misburg.
- 7.) Erprobungsstelle der Luftwaffe Rechlin,
Gruppe Betriebsstoffe E 3 c.

Die Zündwilligkeit, bzw. Cetanzahl der Kraftstoffe wurde nach folgenden Methoden bestimmt:

1.) Chemisch-physikalische Methoden.

- a) Dieselindex nach ASTM
- b) Dichte-Verfahren nach Marder

2.) Motorische Methoden.

- a) Abgeändertes Verfahren nach Dumanois
- b) Ansprungsverfahren nach der Methode von:
Heereswaffenamt (HWA), DVL-Slowak
- c) Zündverzugsverfahren in folgenden Motoren:
FKFS-Motor, I.G.-Prüfdiesel, DVL-Slowak-Motor,
HWA-Motor, CFR-Diesel

Gruppe

Bearbeiter

Tag

9000 2.43

Formkenn Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c
Erpr. Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmkraftstoffen.

Teilbericht 16
Blatt 4

Eine Übersicht über die von den einzelnen Prüfstellen angewendeten Verfahren enthält Tafel 2.

001104

D. Beschreibung der Prüfverfahren

1.) Dieselindex nach ASTM.

Der Dieselindex nach ASTM-Vorschrift errechnet sich wie folgt:

$$\text{Dieselindex} = \frac{\text{Anilinpunkt } ^\circ\text{F} \times \text{A.P.I.} - \text{Dichte}}{100}$$

Die entsprechenden Werte für die 14 geprüften Dieselmkraftstoffe enthält Tafel 3.

2.) Cetanzahl nach Marder.

Nach Marder besteht zwischen der Dichte von Dieselmkraftstoffen (mit gleicher Siedekennziffer = 300°C) und ihrer Cetanzahl die in Abb. 1 dargestellte Beziehung. Das verschiedene Siedeverhalten wird durch einen ebenfalls empirisch gefundenen Berichtigungswert berücksichtigt.

$$\text{Cetanzahl} = \text{CZ 300} - (300 - \text{KZ}) f.$$

Darin bedeuten:

CZ 300 = Cetanzahl nach Kurve Abb. 1, abhängig von der Dichte⁺

KZ = Siedekennziffer, d.h. der Mittelwert der Siedetemperaturen bei 5 %, 15 % 85 %, 95 %.

f. = Berichtigungswert, abhängig von KZ (siehe Abb.1)

+ Für die direkte Bestimmung von CZ 300 sind auch entsprechende Aräometerspindeln entwickelt worden.

Da man inzwischen allgemein von der Cetanzahl zur Cetanzahl übergegangen ist, wurden die errechneten Cetanzahlen mit Hilfe der Abb. 2 in Cetanzahlen umgewandelt.

Die Berechnungsergebnisse für die verschiedenen Kraftstoffe sind in der Tafel 4 zusammengestellt.

3. Motorische Methoden)

Die motorischen Prüfverfahren sind im Teilbericht 14 beschrieben worden. Weitere Einzelheiten sind aus Tafel 2 zu entnehmen.

Gruppe

Bearbeiter

Tag

6000 2.43

Fabriknorm Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c
Erpr. Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmkraftstoffen.

Teilbericht 16

Blatt 5

001105

E. Kritik der verschiedenen Prüfverfahren

1.) Zündverzugsverfahren.

Die von den einzelnen Prüfstellen nach dem Zündverzugsverfahren gefundenen Cetanzahlen sind in Tafel 5 zusammengestellt.

Die Übereinstimmung ist, wenn man die Verschiedenheit der Motoren, der Prüfbedingungen und der für die Zündverzugsmessungen verwendeten Geräte berücksichtigt, recht gut. Lediglich der von der DVL verwendete Slowak-Motor weicht vielleicht infolge des dafür verwendeten Höchstdruckmessers von den übrigen Motoren stark ab, daß er bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurde. Aus den Cetanzahlen der übrigen 7 Motoren wurde für jeden der 14 geprüften Kraftstoffe der Mittelwert gebildet. Diese Mittelwerte werden im folgenden bei der Beurteilung der einzelnen Prüfverfahren stets als Bezugswerte zugrunde gelegt.

In den Abbildungen 7 - 10 sind die in 1 FKFS-Motor, 1 I.G.-Prüfdiesel, 2 HVA-Motoren und 3 CFR-Motoren gefundenen Cetanzahlen, abhängig von den Mittelwerten für die gesamten Zündverzugsmessungen, graphisch dargestellt. Für diese 4 Motorentypen ergibt sich folgender Vergleich:

Prüfmotor	FKFS	I.G.-Diesel	HVA	CFR-Diesel
Prüfgenauigkeit, ca.	$\pm 1.5^{+)}$	$\pm 1^{+)}$	± 1	± 2.5
Mittlere Abweichung vom Mittelwert	+0.5	- 1.9	+ 1.5	- 0.6

+) nach Angabe der FKFS bzw. I.G.

Der FKFS-Motor liegt fast genau mit den Mittelwerten zusammen. Seine Prüfgenauigkeit ist befriedigend. Fehlerquellen können durch Verschmutzen des Quarzfensters auftreten.

Der I.G.-Diesel liegt etwas unter den Mittelwerten. Die Prüfgenauigkeit ist gut. Die für die Zündverzugsmessung verwendete Apparatur, Quarzgeber mit Braunscher Röhre, gestattet ausser der einfachen Cetanzahlbestimmung auch ein eingehenderes Studium der Verbrennungsvorgänge durch Aufnahme von Indikatordiagrammen. Für einfache Prüfstellen, in denen lediglich Cetanzahlen ermittelt werden sollen und kein besonders geschultes Personal zur Verfügung steht, ist diese Apparatur zu teuer und zu kompliziert in der Bedienung und Wartung.

Gruppe

Bearbeiter

Tag

8000 2 43

Fabriknum Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c
Erpr. Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmotoren 001106

Teilbericht 16
Blatt 6

Der HWA-Motor liegt etwas über den Mittelwerten. Seine Prüfgenauigkeit ist gut. Die bei diesen Versuchen für die Messung des Einspritzbeginns und des Druckanstieges verwendeten Trägheitsindikatoren nach Dr. Neumann sind verhältnismäßig billig, betriebssicher und leicht zu warten. Die ^{Messung}erfolgt schnell und erfordert keine besonderen Kenntnisse.

Der CFR-Dieselmotor ergibt zwar dadurch, daß Mittelwerte aus 3 Motoren gebildet werden konnten, eine sehr gute Übereinstimmung mit den Gesamt-Mittelwerten des Zündverzugsverfahrens. Jedoch ist die Reproduzierbarkeit der Meßwerte und damit die Versuchsgenauigkeit schlechter als bei den anderen Motoren. Die z.T. ziemlich großen Unterschiede zwischen den 3 einzelnen CFR-Motoren erklären sich dadurch, daß nicht nur verschiedene Zündverzugsmeßverfahren benutzt wurden, sondern die Motoren auch bauliche Unterschiede aufwiesen. Daher kommt es, daß die CFR-Motoren der I.G. und Intava recht gut mit den Mittelwerten übereinstimmen, während der noch nicht mit dem Wirbelkopf ausgerüstete CFR-Diesel der E-Stelle Rechlin stärkere Abweichungen ergibt. Im übrigen kommt der amerikanische CFR-Diesel-Motor schon wegen der Ersatzteilbeschaffung künftig nicht mehr infrage.

Ein besonders interessantes Ergebnis dieser Vergleichsversuche ist, daß - ganz anders als bei der Klopfestigkeitsprüfung von Otto-Kraftstoffen - das Kraftstoff-Luft-Verhältnis keine besonders wichtige Rolle zu spielen scheint, wenigstens bei den in vorstehenden Motoren angewandten verhältnismäßig hohen Luftüberschuszahlen. Diese betragen etwa 12 beim HWA-Motor und etwa 2 - 3 bei den anderen Motoren!

2.) Ansprungsverfahren.

Die Ergebnisse nach dem Ansprungsverfahren enthält Tafel 6. Auch hier fällt der Slowak-Motor wieder so stark heraus, daß er unberücksichtigt blieb, und nur die 3 HWA-Motoren für die Beurteilung herangezogen wurden.

Wie aus Tafel 7 und der graphischen Darstellung Abb. 6 hervorgeht, ist für den Mittelwert der 3 HWA-Motoren die Übereinstimmung mit dem Zündverzugsverfahren im Cetanzahlbereich 35 - 45 befriedigend; allerdings betragen auch hierbei die maximalen Unterschiede zwischen den einzelnen Motoren schon ± 3 Cetanzahlen. Im Cetanzahlbereich über 45 ergibt das HWA-Verfahren Werte, die wesentlich höher liegen als beim Zündverzugsverfahren; außerdem wird die Versuchsgenauigkeit noch wesentlich schlechter.

Gruppe

Bearbeiter

Tag

5000 2. 43

Fabrikname Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c	Verfahren zur Cetanzahlbestimmung von Dieselmotoren. 001107	Teilbericht 16
Erpr.Nr. 2363		Blatt 7

Neuerdings sind die Temperaturen des Kühlwassers und der Ansaugluft beim HWA-Verfahren von 45°C auf 70°C, bzw. 80°C heraufgesetzt worden. Wie sich das auswirkt, ergeben nachstehende, sämtlich in HWA-Motoren durchgeführte Cetanzahlbestimmungen:

Kraftstoff Rechlin-Muster Nr.	A 11452	B 11453	C 11454	D 11455	Kühlwasser °C	Luft °C
<u>Anspringverfahren:</u>						
Prüfstelle: HWA	35	44.5	53	43	70	80
" Rechlin	33	42	49	41	80	80
<u>Zündverzugsverfahren:</u>						
Prüfstelle: Rechlin	37	47	55	48	45	45
" : Rhenania	-	49	57	49.5	45	45

Die Werte des HWA-Anspringverfahrens werden also durch die Temperaturerhöhungen herabgesetzt. In dem mittleren Cetanzahlgebiete, in dem bei den früheren Prüfbedingungen eine befriedigende Übereinstimmung mit dem Zündverzugsverfahren bestand, wird diese also nur verschlechtert. Ob im höheren Cetanzahlbereich gegen früher eine bessere Angleichung an das Zündverzugsverfahren erreicht wird, geht aus vorstehenden, vom HWA angeregten Versuchen leider nicht hervor.

Zusammenfassend ist also für das HWA-Anspringverfahren festzustellen, daß die Versuchsgenauigkeit wesentlich verbessert werden müßte, was zweifellos möglich ist, daß aber vor allem keine befriedigende Übereinstimmung mit dem Zündverzugsverfahren über den ganzen Cetanzahlbereich, auch nicht durch die Abänderungen der Versuchsbedingungen zu erreichen sein dürfte. Durch das Anlaßverfahren wird allenfalls das Ansprungsverhalten eines Dieselmotorkraftstoffes im kalten Motor gewertet, während das Zündverzugsverfahren den Zündvorgang im betriebswarmen Motor bestimmt, also der Klopfestigkeitsprüfung von Otto-Kraftstoffen entspricht.

3.) Abgeändertes Verfahren nach Dumanois.

Bei dem (hier etwas abgeänderten) Verfahren nach Dumanois wird die Oktanzahl eines zum Zwecke besserer Vergasung mit Benzin verdünnten Dieselmotorkraftstoffes bestimmt und aus einer Eichkurve die in reziproker Beziehung zur

Gruppe	Bearbeiter	Tag		
--------	------------	-----	--	--

Rechlin E 3 c
Erpr. Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmkraftstoffen. 001108

Teilbericht 16

Blatt 8

Oktanzahl stehende Cetanzahl ermittelt. Für dieses Verfahren könnten also einfach ohne jede Umänderung die für die Oktanzahlbestimmung verwendeten CFR-Motoren oder I.G. - Prüfmotoren Verwendung finden. Das Verfahren ist jedoch sehr ungenau und ergibt zu große Abweichungen vom Zündverzugsverfahren (vergl. Abb. 5 und Tafel 7).

4.) Dieselindex nach ASTM.

Der Dieselindex steht in keinem eindeutigen Zusammenhang mit der Cetanzahl (vergl. Abb. 3 und Tafel 7).

5.) Cetanzahlbestimmung nach Harder.

Nach dem Dichtoverfahren von Harder lassen sich Cetanzahlen mit einer Genauigkeit von nur etwa ± 6 ermitteln. Bei Zusatz von Zündpeitschen zum Kraftstoff muß diese Methode grundsätzlich versagen.

Das Verfahren ist also als zu ungenau abzulehnen.

(vergl. Abb.4 und Tafel 7).

Gruppe

Bearbeiter

Tag

8000 2.43

Fabrikname Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselkraftstoffen.

Teilbericht 16

Erpr. Nr. 2363

001109

Blatt 9

Tafel 1: Analytische Daten der Kraftstoffe

Nr.	Re Muster Nr.	Herkunft u. Bezeichnung	d/15°C	Anilin- Punkt °C	Siedebe- ginn °C	20 Vol% überge- gangen bis °C	300 °C überge- gangen Vol. %	Siedeo- de °C	Siedeko- gn- ziffer °C
1	1856	Shell-Ver- suchsöl	0.871	49	168	293	92	333	256
2	875	I.G. I	0.876	29.4	135	277	> 95	320	228
3	1610	Deurag Crack-Gas- öl	0.889	25	204	266	> 95	313	240
4	914	Braunkohlend- Werschen- Weitenfels	0.900	30.4	164	326	74	364	278
5	859	Standard B	0.859	64	201	318	78	350	272
6	2094	Deurag	0.879	44	213	310	83	333	265
7	856	Olex Glüh- kopf	0.867	53	214	318	82	364	272
8	4932	I.G. DT 1001	0.803	67.5	122	236	> 95	270	203
9	1065	Barop	0.856	66.6	189	338	70	374	281
10	1070	Shell	0.845	62.6	180	319	83	357	267
11	1338	Nitag	0.835	64.8	176	311	85	344	255
12	853	Standard A	0.843	79	243	318	67	343	291
13	1068	Olex	0.837	66.5	210	320	83	367	271
14	874	Ruhrchemie	0.762	85.9	190	266	> 95	298	237

Gruppe

Bearbeiter

Tag

Rechlin E 3 c			Verfahren zur Cetanzahlbestimmung von Dieselmotoren.			Teilbericht 16						
Erpr. Nr. 2363			001110			Blatt 10						
Tafel 2: Zusammenstellung der Prüfstellen und Motoren.												
Prüfstelle	Prüfverfahren	Motor	Zyl.-Inhalt, Liter	Hub mm	Bohrung mm	ξ	Kraftstoffmenge pro Hub cm ³	Zündvorzug OKW	Meßgerät druck beginn	Ein-spritzbeginn	Ein-spritzdruck	Kühlwasserspritztemperatur °C
1.) FKFS, Stuttgart	Anspringverfahren	HWA	1.92	170	120	14.5	960	130	-	160	ca. 20	45
2.) HWA, Hannover	"	HWA	1.92	170	120	14.5	940	130	-	160	ca. 20	45
3.) DVL, Berlin	"	Slowak	1.62	170	110	variabel	700	150	-	160	18	70
4.) E' Stelle Rechlin	"	HWA	1.92	170	120	14.5	960	130	-	160	ca. 20	45
5.) FKFS, Stuttgart	Zündvorzugverfahren	FKFS	1.020	130	100	13	1800	35	variabel	Fotozelle u. Quarzfenster	20	70
6.) I.G. Ludwigshafen	"	I.G. Prüf Diesel	1.063	150	95	variabel	950	35	18	Quarzgeber mit Braunschweiger Röhre	220	100
7.) DVL, Berlin	"	Slowak	1.62	170	110	variabel	700	150	ca. 18	Höchstdruckmesser	160	70
8.) Rheinania Osseg Hbg.	"	HWA	1.92	170	120	14.5	900	16	ca. 18	Trägheitsindikatoren mit Neon Rohr-anzeige	ca. 20	45
9.) E' Stelle Rechlin	"	HWA	1.92	170	120	14.5	950	13	ca. 18	dto.	160	45
Gruppe	Bearbeiter	Tag										

Rechlin E 3 o										Verfahren zur Cetanzahlbestimmung von Dieselmotoren				Teilbericht 16	
Erpr. Nr. 2363										001111				neu 11	
Tafel 2: Zusammenstellung der Prüfstellen und Motoren.															
Prüfstelle	Prüfver- fahren	Motor	Zyl.-In- halt Liter	Boh- rung mm	Hub mm	Σ	n	Kraft- stoff- menge pro Hub cm ³	Zünd- verzög. °KW	Mot.- gerät	Ein- spritz- druck atü	Ein- spritz- beginn °KW	Kühl- wasser- tempe- ratur °C		
10.) I.G. Ludwigshafen	Zündver- fahren	C.F.R. 0.612	114.3	82.5	82.5	12	600	20	18	Quarzge- ber mit Braunsche Röhre	-	-	100		
11.) Intava Hamburg	"	C.F.R. 0.612	114.3	82.5	82.5	12	600	20	Vari- abel	Kontakt mit Glüh- lampe am Schwungrad	104.5	12	100		
12.) E'Stelle Rechlin	"	C.F.R. 0.612	114.3	82.5	82.5	vari- abel	300	29	12	Quarzge- ber mit Braunsche Röhre	105/130	14	100		
13.) E'Stelle Rechlin	Dumas- verfahren	C.F.R. 0.612	144.3	82.5	82.5	vari- abel	900	29	-	-	-	-	100		
Gruppe		Bearbeiter				Tag									

Rechlin E 3 c
Erpr.Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmkraftstoffen.

001112

Teilbericht 16
Blatt 12

Tafel 3: Berechnung des Dieselindex nach ASTM.

Kraftstoff	Anilinpunkt		A.P.J. Dichte	Dieselindex
	°C	°F		
1	49	120.2	30.6	36.8
2	29.4	86.2	29.7	25.6
3	25	77	27.3	21.5
4	30.4	86.8	25.3	22.6
5	64	147.4	32.9	48.5
6	44	111.2	29.1	33.2
7	53	127.4	31.4	40.0
8	67.5	153.5	44.3	68
9	66.6	151.7	33.5	50.8
10	62.6	144.5	35.6	51.4
11	64.8	148.6	37.6	55.8
12	79.0	174.2	36	62.6
13	66.5	151.7	37.2	56.4
14	85.9	186.6	53.7	100.3

Gruppe

Bearbeiter

Tag

Form 2.43

Fabriknum Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c
Erpr.Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieseldkraftstoffen

Teilbericht 16

Blatt 13

001113

Tafel 4: Bestimmung der Cetanzahl nach Herder.

Kraftstoff	Dichte 20°C	CZ 300	KZ °C	f	300-KZ	(300-KZ)f	Cetanzahl	Cetanzahl
1	0.868	63	256	0.345	44	15.2	48	42
2	0.873	61	228	0.37	78	28.8	32	29
3	0.886	56	240	0.36	60	21.6	34.5	31
4	0.897	51.5	278	0.32	22	7.9	44.5	39
5	0.856	68.5	272	0.33	28	9.3	59	50
6	0.876	60	265	0.335	35	11.7	48.5	42
7	0.864	65	272	0.33	28	9.2	56	47.5
8	0.799	97	203	0.40	97	38.8	58	49
9	0.853	70	281	0.32	19	6.1	64	53.5
10	0.842	75	267	0.33	33	10.9	64	53.5
11	0.832	79.5	255	0.345	45	15.5	64	53.5
12	0.840	76	291	0.31	9	2.8	73	60
13	0.834	78.5	271	0.33	29.	9.6	69	57
14	0.758	123.5	237	0.36	63	22.7	101	78

Gruppe

Bearbeiter

Tag

8000 2.45

Fabriknum Berlin-Friedenau

Tafel 5: Oetanzahlen nach dem Zündverzugsverfahren

Tafel 5: Octanzahlen nach dem Zündverzugsverfahren									
Prüfstelle	FFFS	I.G.	WV	Rhenania	Rechlin	I.G.	Intava	Rechlin	Mittelwert Gröste Abweichung
Motor	FFFS	I.G. Diesel	Slowak	HVA	HVA	CFR	CFR	CFR	
Kraftstoff 1	33.5	33.5	(45)	35.5	36.5	34	36	34.5	1.6
2	36.5	34.5	(41)	35.5	36	36	36.5	33	1.1
3	38	37	(44)	36.5	37.5	37	38	34.5	1.1
4	39.5	38	(42)	38	34 ?	37	40	42	3.6
5	43.5	41	(52)	44	44.5	41	43.5	42	1.7
6	44.5	40	(47)	43	43.5	42	44.5	44	1.4
7	45	42.5	(48)	45.5	46	44.5	44	41.5	1.9
8	46.5	46	(57)	51	52.5	46	51	43 ?	4.5
9	50	46	(51)	51	51	46	48	46	2.7
10	51.5	47.5	(56)	52	52.5	49.5	49.5	45.5	2.8
11	53.5	49	(60)	54.5	55.5	51	50.5	51	3.3
12	57	52	(57)	57.5	58.5	55	54.5	52	3.2
13	63.5	58.5	(54)	63.5	65	62	59	63	3.2
14	78.5 ?	83	(75)	85	85.5	85	82.5	(92)	3.6
Mittelwert +2.4 -3.2									4.8
Anmerkung: Die eingeklammerten Werte sind bei den Mittelwerten und Abweichungen nicht berücksichtigt!									
Gruppe	Bearbeiter		Tag						

Reochlin E 3 c
 Erpr.Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
 von Dieselmkraftstoffen.

Teilbericht 16
 Blatt 15

Tafel 6: Cetanzahlen nach dem Anspringsverfahren.

Prüfstelle	DVL	FKFS	Nerag	Reochlin	Mittelwert der 3 HWA-Motoren	Größte Abweichung		
						+	-	
Motor	Slowak	HWA	HWA	HWA				
Kraftstoff	1	(47)	34	38	35	35.7	2.3	1.7
	2	(45)	32.5	36	34	34.2	1.8	1.7
	3	(46)	36	39.5	37.5	37.7	1.8	1.7
	4	(43)	37	41.5	37	38.5	3.0	1.5
	5	(50)	42	46	41	43.0	3.0	2.0
	6	(47)	40	46	41	43.3	3.7	2.3
	7	(49)	44	48.5	43	45.2	3.3	2.2
	8	(54)	49	56	44	49.7	6.3	5.7
	9	(50)	51.5	56	47	51.5	4.5	4.5
	10	(55)	54	60	49.5	54.5	5.5	5.0
	11	(59)	55	61	49.5	55.2	5.8	5.7
	12	(58)	58.5	65.5	55	59.7	5.8	4.7
	13	(54)	68	76.5	-	72.2	4.3	4.2
	14	(79)	99 ?	-	81.5	90.3	8.7	8.8

Anmerkung:
Die eingeklammerten Werte sind bei den Mittelwerten und Abweichungen nicht berücksichtigt!

Mittelwert: +4.3 -2.7

8000 A. 41

Rechlin E 3 c		Verfahren zur Cetanzahlbestimmung von Dieseldkraftstoffen.		Teilbericht 16	
Expr.Nr. 2363				Blatt 16	
Tafel 7: Mittelwerte aller Prüfverfahren.					
Prüfverfahren	Zündverzugsverfahren (ohne Slovak-Motor)	Anspringverfahren (nur HWA-Motoren)	Dumanois	Marder	ASTM
	Cetanzahl	Cetanzahl	Cetanzahl	Cetanzahl	Dieselindex
Kraftstoff					
1	34.3	35.7	28.1	42	36.8
2	35.4	34.2	31.5	29	25.6
3	36.9	37.7	33.0	31	21.5
4	38.4	38.5	37.0	39	22.6
5	42.8	43.0	33	50	48.5
6	43.1	42.3	40	42	33.2
7	44.1	45.2	29	47.5	40.0
8	48.0	49.7	-	49	68
9	48.3	51.5	45.3	53.5	50.8
10	49.7	54.5	45	53.5	51.4
11	52.2	55.2	51	53.5	55.8
12	55.2	59.7	48.3	60	62.6
13	62.1	72.2	57.6	57	56.4
14	83.3	90.3	96	78	100.3
001116					
Gruppe	Bearbeiter	Tag			
Fabrikname Berlin-Friedenau					

Rechlin E3c
Erpr.Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmotorkraftstoffen

Teilbericht 16
Blatt 17

001117

Abb. 1. Cetanzahl-Bestimmung nach Marder

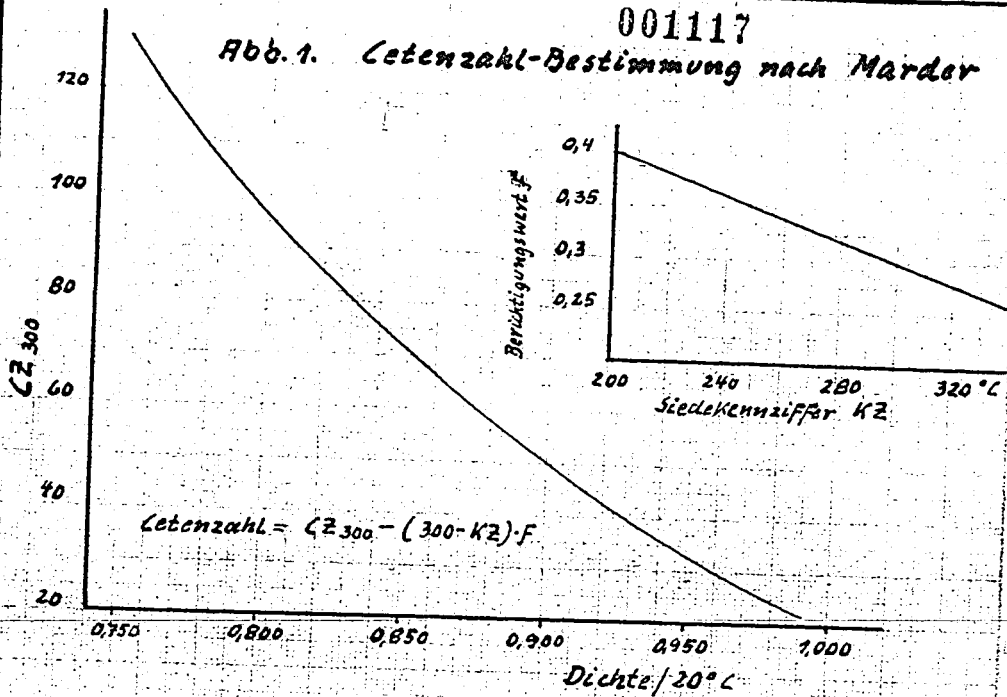
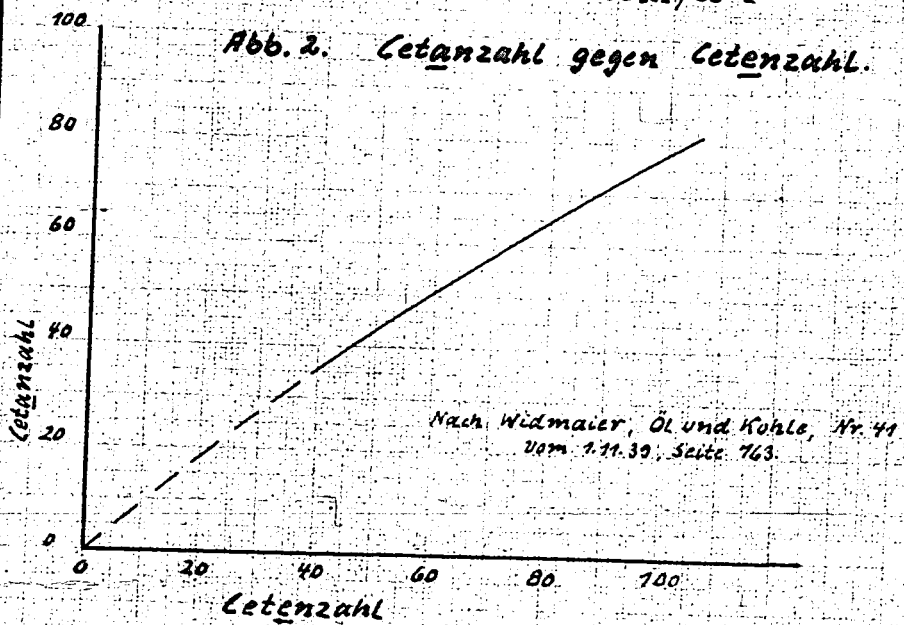


Abb. 2. Cetanzahl gegen Cetanzahl.



Gruppe E3C1

Bearbeiter Lange

Tag

2000 2 41 Millimeter-Stammblatt G 58a A4

Fabrikname Berlin-Friedenau

Rechlin E 3 c
Erpr.Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselkraftstoffen

Teilbericht 16
Blatt 18

001118
Abb. 3. Dieselinde~~x~~ nach ASTM.

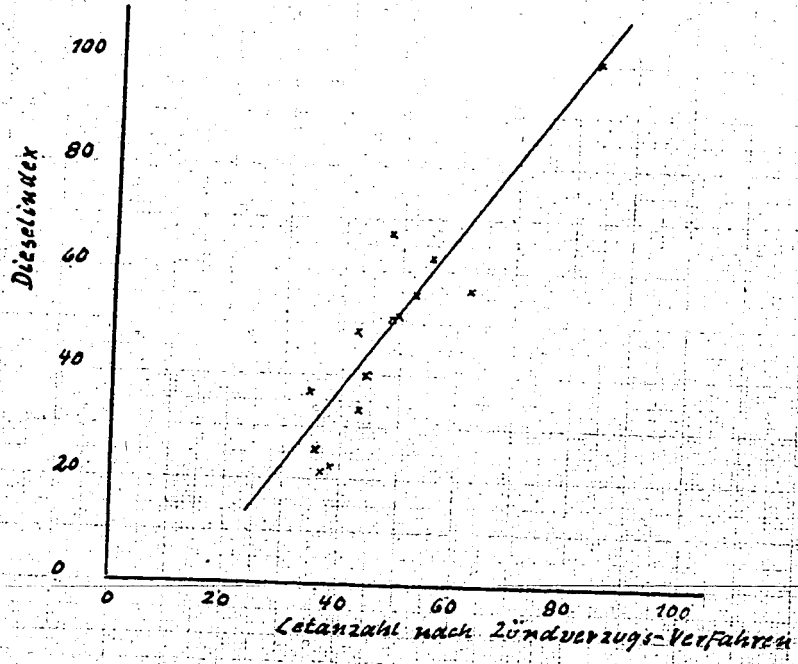
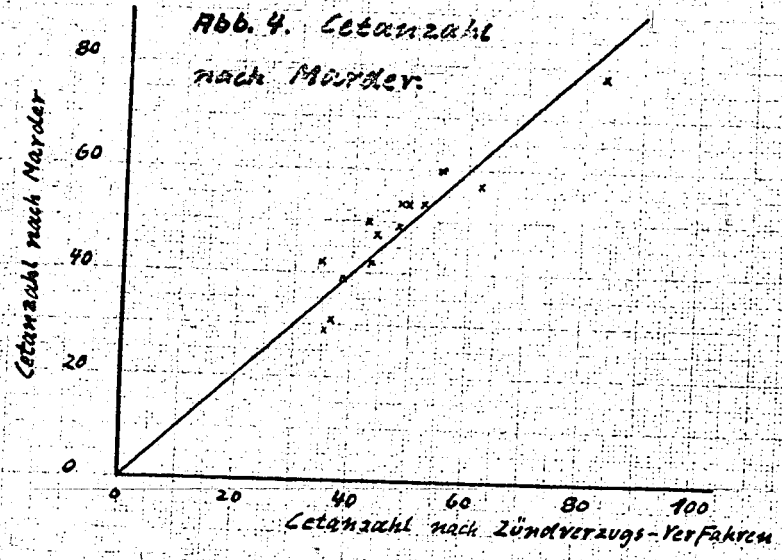


Abb. 4. Cetanzahl
nach Marder.



Gruppe E3C1	Bearbeiter Lange	Tag		
----------------	---------------------	-----	--	--

2000 2. 41 Millimeter-Stemmblatt G-88a A4

Fabrikname Berlin-Friedenau

Rechlin E3c
Erpr.Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselkraftstoffen.

Teilbericht

Blatt 19

001119

Abb.5. Verfahren nach Dumanois.

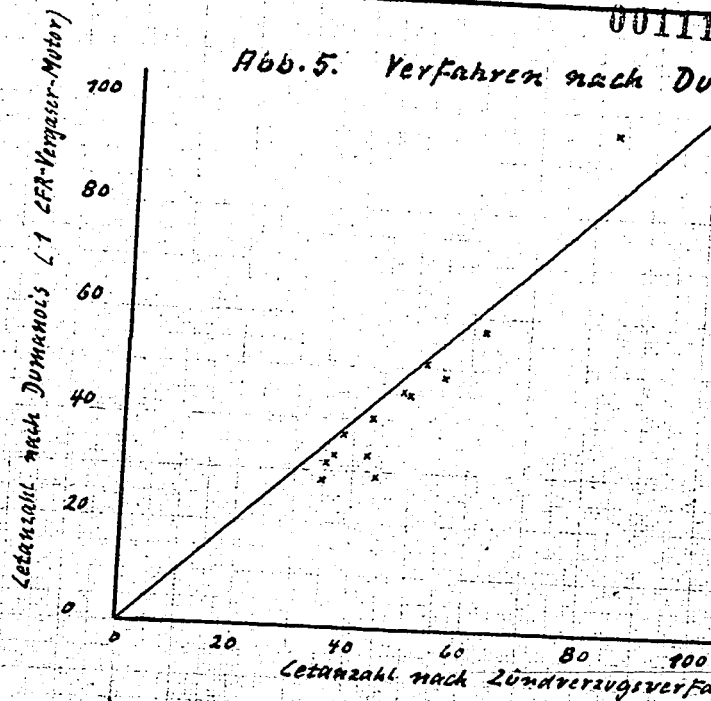
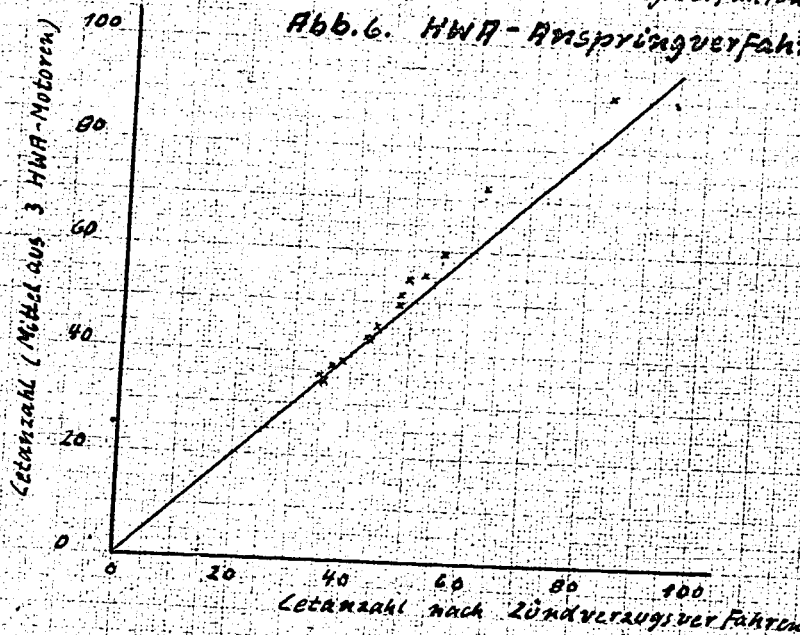


Abb.6. HWA-Anspringverfahren.



Gruppe E3c

Bearbeiter
Lange

Tag

2000 2. 01 Millimeter-Stammblatt Größe A4

Fabrikform Berlin-Friedenau

Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

K O D A K S A F E T Y A

Rechlin 3 c Erpr.Nr. 2363	Verfahren zur Cetanzahlbestimmung von Dieselkraftstoffen.	Teilbericht 16 Blatt 20
------------------------------	--	----------------------------

Abb. 7. Zündverzugsverfahren im FKFS-Motor

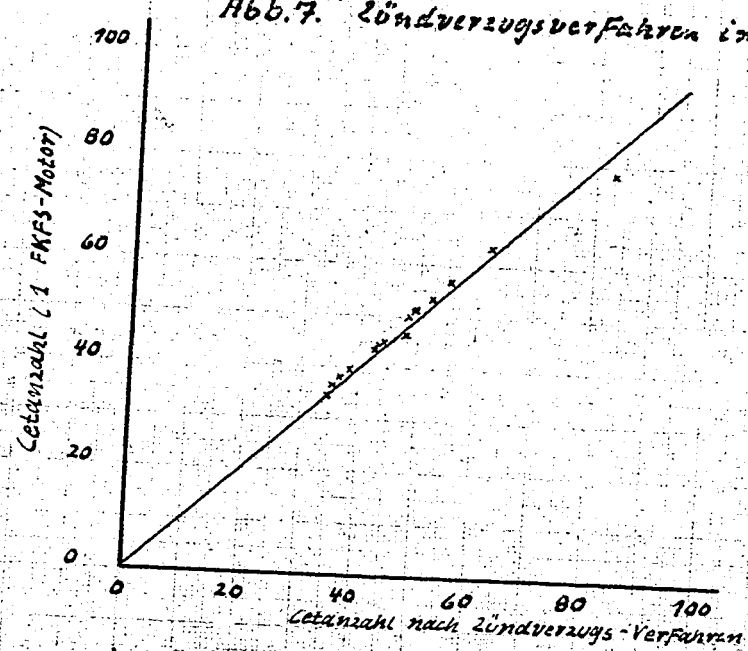
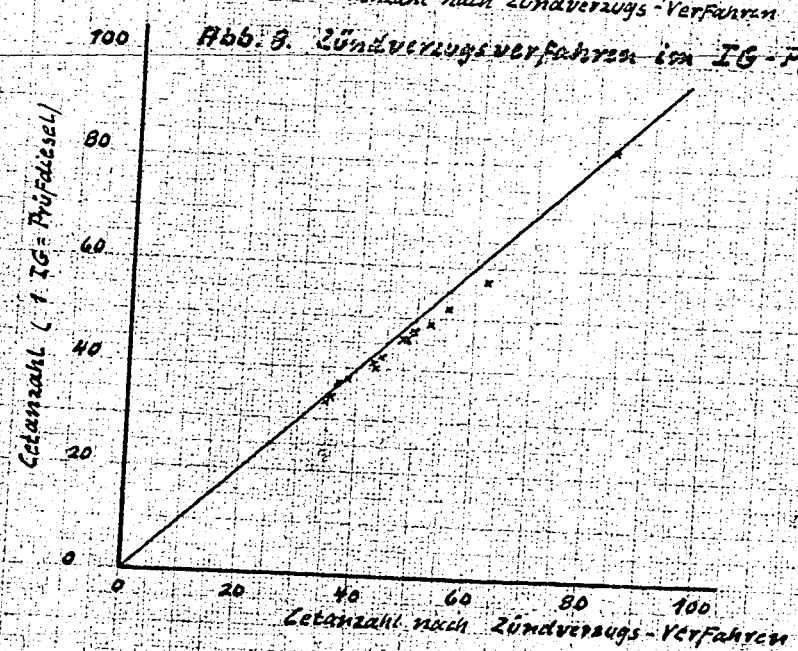


Abb. 8. Zündverzugsverfahren im IG-Prüfdiesel.



Gruppe E351	Bearbeiter Lange	Tag 	 	
-----------------------	----------------------------	-------------	------	------

2000 2. 4.1 Millimeter-Stammblatt G. 82a A4

Fabrikname Berlin-Friedenau

Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

Rechlin E 3 c
Erpr.Nr. 2363

Verfahren zur Cetanzahlbestimmung
von Dieselmotoren.

Teilbericht 16
Blatt 21

Abb. 9. Zündverzugsverfahren in HWR-Motoren.

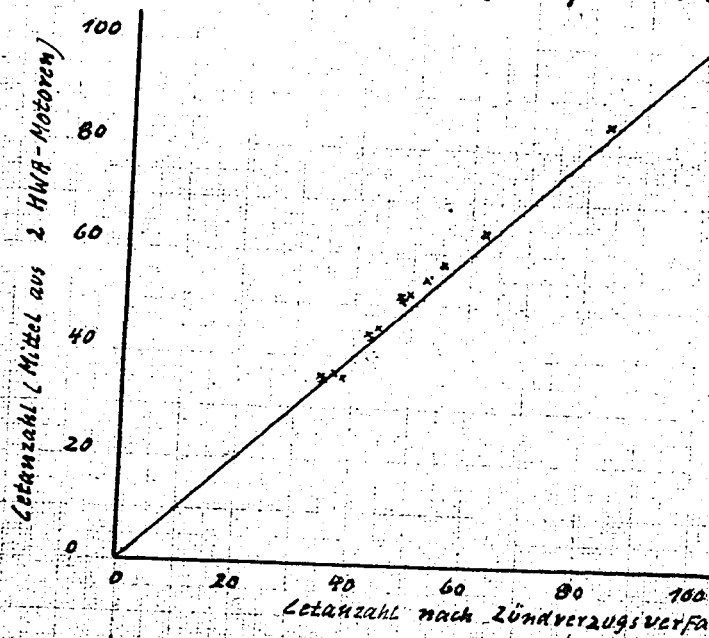
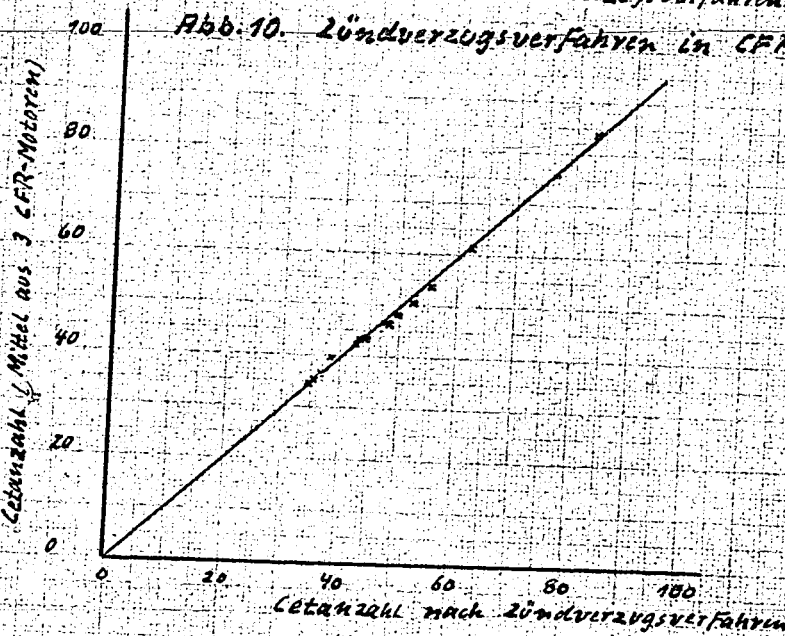


Abb. 10. Zündverzugsverfahren in CFR-Motoren.



Gruppe E3c1

Bearbeiter Lange

Tag

2000 2.41 Millimeter-Steinblei G.80e A4

Fabriknorm Berlin-Friedensau

Erdr.Nr.2337

Verhalten von Flugkraftstoffen beim Höhenflug.

001122

Teilbericht 2

Blatt

G e h e i m !

Re. No. 4667/42. Rech.

Rechlin, den 18. April 1942

Zusammenfassung.

103

Durch einen Höhenkraftstoff mit 0.2 kg/cm^2 Reid-Dampfdruck in Verbindung mit Behälterpumpen, die in der Höhe (1) einen Überdruck von 0.25 at aufrecht erhalten, und durch Anbringung eines Überdruckventils am Tank anstelle der Entlüftung, ließen sich Dampfblasenbildung und Verdampfungsverluste auch bei extremen Temperaturen (50°C) bis 19 km vollkommen unterdrücken.

Bearbeiter:

Dr. Ginzman

Fl. Stabsing.

Gesehen:

1. The first step in the process is to identify the problem or issue that needs to be addressed. This involves gathering information and understanding the context of the problem.

Leiter der Erprobungsstelle

Verteiler:

- 1 x GL/A-M II B

- 1 x GL/A-M II C

- 1 x GL/C-E 2

- 1 x GL/C-E 3

- 1 x K.d.E.

- 1 x E'Stelle Travemünde E 5 L

- 1 x DVL, Institut für Betriebsstoffforschung

- 1 x I.G. Farbenindustrie A.G. Ludwigshafen (Dr. Pior)

- I. G. Farbenindustrie A.G., Berlin

- 1 x E 2 s

- 1 x E 3

- 1 x E 3 b

- 1 x E 3. c

Dieser Bericht enthält 37 Blätter

Bearbeiter:

Lesson:

3. Methoden

E30Dr. Giesmann

Gruppo

Bearbeiter

Tag

A. Aufgabe

Es ist zu untersuchen, bis^{zu} welchen Höhen die heutigen B 4- und C 3-Kraftstoffe unter den ungünstigsten Betriebsbedingungen verwendbar sind, bzw. welche Eigenschaften Otto-Kraftstoffe für Höhenmotoren besitzen müssen.

B. Ergebnis

Unter ungünstigsten Bedingungen (Kraftstoff-Temperatur bei Tropenverhältnissen ca. 50°C) kann mit B 4-Kraftstoff schon unter 1 km Flughöhe bei C 3-Kraftstoff ab etwa 2 km Dampfblasenbildung und damit eine Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr eintreten. Durch Verwendung von Behälterpumpen mit ausreichend hohem Förderdruck lassen sich ganz wesentliche Höhengewinne erzielen. Dasselbe erreicht man durch Verwendung von Kraftstoffen mit niedrigem Reid-Dampfdruck (siehe Tafel 5-7).

Ab etwa 3 km bzw. 5 km treten bei normalen B 4-, bzw. C 3-Kraftstoffen (bei 50°C) Verdampfungsverluste auf, die mit wachsender Flughöhe immer stärker werden (vergl. Tafel 8) und damit die Reichweite untragbar beeinflussen. Eine Herabsetzung des Reid-Dampfdruckes des Kraftstoffes auf 0.2 kg/cm^2 verringert die Verdampfungsverluste zwar wesentlich, kann sie aber bei höherer Kraftstofftemperatur doch nicht ganz aufheben. Verdampfungsverluste ließen sich dadurch ganz vermeiden, daß die Flugzeugtanks anstelle der Entlüftung ein Ventil erhalten, das sich bei Auftreten eines Überdruckes im Tank durch verdampfte Kraftstoffteile schließt.

Von den heute üblichen Kraftstoffsorten B 4 und C 3 eignet sich letzterer besser zur Herstellung eines Höhenkraftstoffes mit niedrigem Dampfdruck, weil C 3 durch das Abdestillieren der leichtsiedenden Bestandteile an Klopffestigkeit gewinnt, B 4 dagegen verliert.

Notwendige weitere Versuche

- 1.) Flugversuche in sehr großer Höhe mit einem Kraftstoff niedrigen Dampfdruckes (ca. 0.2 kg/cm^2).
- 2.) Entwicklung und Erprobung eines Ventils für Flugzeugtanks zur Vermeidung von Verdampfungsverlusten unter besonderer Berücksichtigung der Festigkeit und Beschußsicherheit geschützter Behälter.

C. Durchführung,1.) Allgemeines über Dampfdrücke.

Für die Dämpfe einheitlicher Kohlenwasserstoffe gilt die angenäherte Clapeyronsche Gleichung:

$$\log \left(\frac{P}{P_0} \right) = \frac{m \cdot r}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (1)$$

Darin bedeuten:

P = Druck bei der absoluten Temperatur T °C

P₀ = Normaldruck (760 mm Hg, bzw. 1.033 kg/cm²)

T₀ = Normalsiedetemperatur in abs. °C bei Druck P₀

m = Molekulargewicht des Dampfes

r = Verdampfungswärme

R = Gaskonstante

Wenn man die Stoffeigenschaften in einer Konstanten A zusammenfasst, ergibt sich aus Gleichung (1):

$$\log \left(\frac{P}{P_0} \right) = A \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2)$$

Oder wenn die niedrigste Temperatur T bzw. t gesucht ist, bei der bei einem Gegendruck P Verdampfung einsetzt, löst man nach T oder t wie folgt auf:

$$T = \frac{A \cdot T_0}{A - \log \left(\frac{P}{P_0} \right)} \quad (3a)$$

$$t = \frac{A \cdot t_0 + 273 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)}{A - \log \left(\frac{P}{P_0} \right)} \quad (3b)$$

Für einheitliche Kohlenwasserstoffe ist $A = \frac{m \cdot r}{R \cdot T_0}$

Brigden und Mitarbeiter fanden empirisch, dass die Gleichungen (2) und (3) mit praktisch ausreichender Genauigkeit auch für die verschiedensten Kohlenwasserstoffgemische, wie sie die Otto-Kraftstoffe darstellen, mit Ausnahme von Alkoholgemischen gelten, wenn man anstelle der Normalsiedetemperatur T₀ bzw. t₀ den 10 %-Punkt der ASTM-Siedekurve T 10 % bzw. t 10 % und für A folgenden Ausdruck einsetzt:

$$A = 5.41 + 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot t_{10\%} - 0.6 \sqrt{3} \quad (4a)$$

$$\text{oder } A = 4.45 + 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot T_{10\%} - 0.6 \sqrt{3} \quad (4b)$$

Darin bedeuten:

$T_{10\%}$ bzw. $t_{10\%}$ = 10%-Punkt der ASTM-Siedekurve ($^{\circ}\text{C}$)

S = Tangente der ASTM-Siedekurve im 10%-Punkt
($^{\circ}\text{C}$ pro 1 % Verdampfes)

Die Kraftstoffkonstante A hat nach Angabe von Bridgman für normale Ottokraftstoffe einen Wert von etwa 4,0.

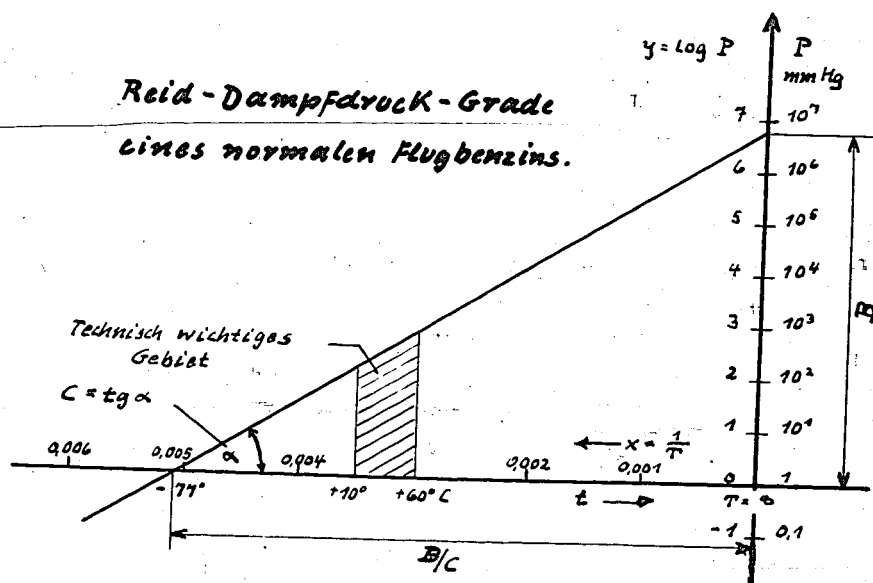
Gleichung (2) läßt sich noch in folgende Form bringen:

$$\log P = (\log P_0 + A) - \frac{A \cdot T_0}{T} \quad (5a)$$

$$\log P = B - \frac{C}{T} \quad (5b)$$

$$y = B - \frac{C}{x} \quad (5c)$$

Daraus geht hervor, dass man die Temperatur-Dampfdruckkurve durch eine Gerade darstellen, also durch wenige Messwerte festlegen kann, wenn man als Ordinate $\log P$ und als Abscisse $\frac{1}{T}$ wählt.



Für einheitliche Stoffe gibt es nur eine einzige derartige Dampfdruck-gerade; d.h. einer bestimmten Temperatur ist eindeutig ein bestimmter Dampfdruck (Sättigungsdruck) zugeordnet. Bei Gemischen hängt der Dampfdruck aber nicht allein von der Temperatur, sondern außerdem von dem Verhält-

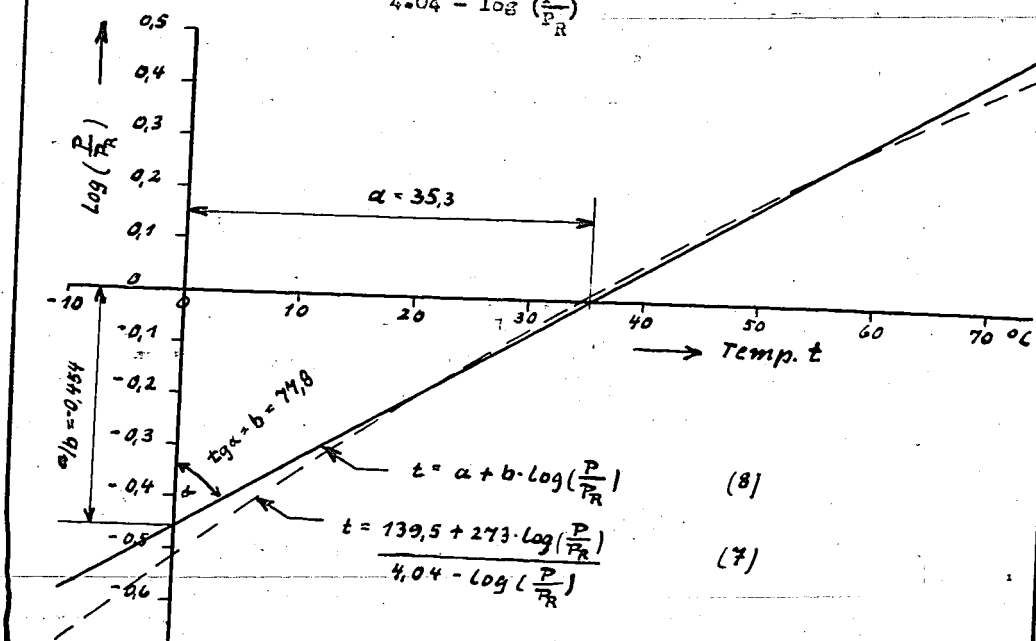
nis $\gamma = \frac{\text{Dampfvolumen}}{\text{Flüssigkeitsvolumen}}$ ab. Je nach γ gibt es also für einen Kraftstoff unendlich viele Graden, deren jede aber wiederum - unter Veränderung der Konstanten - durch Gleichung (5) wiedergegeben wird. Der höchste Dampfdruck in einem Kraftstoffbehälter herrscht dann, wenn dieser ganz voll ist ($\gamma = 0$). Mit wachsendem γ , also bei geringerer Befüllung nimmt der Dampfdruck ab.

Die Bestimmung des größtmöglichen Dampfdruckes $P_{\max}(\gamma = 0)$ ist sehr schwierig. Deshalb hat sich die zwar nicht sehr genau, aber einfache Dampfdruckbestimmung nach Reid allgemein eingebürgert. Bei dieser beträgt das Verhältnis $\gamma = 4$. Nach Bridgman ist

$$P_{\max} = P_{\text{Reid}} \quad 1.1 \quad (6)$$

Als Beweis für die allgemeine Gültigkeit der Gleichung (5) sind in Tafel I die Dampfdruckkurven des Wassers, verschiedener Benzine und einheitlicher Kohlenwasserstoffe, die der Literatur entnommen oder in Reclin mit der Reid-Apparatur bestimmt wurden, aufgezeichnet worden. Gleichung (5b) ergibt, wenn man für $A = 4$, für $t_0 = 37.8^\circ\text{C}$ und für $P_0 = 1.1 P_R$ einsetzt, folgendes:

$$t = \frac{139.5 + 273 \log \left(\frac{P}{P_R} \right)}{4.04 - \log \left(\frac{P}{P_R} \right)} \quad (7)$$



001127

Teilbericht 2

Blatt 6

Die durch Gleichung (7) gegebene Funktion $f(t, \log \frac{P}{P_R})$ kann, wie vorstehende graphische Darstellung zeigt, für einen beschränkten Temperaturbereich, also z.B. für die hier interessierenden Werte von etwa 15 bis 60°C, mit ausreichender Genauigkeit durch folgende lineare Funktion ersetzt werden:

$$t = 35.5 + 77.8 \log \left(\frac{P}{P_R} \right) \quad (8)$$

worin bedeuten:

t = kritische Dampfbildungstemperatur in °C

P = der zu t gehörige Dampfdruck in kg/cm²

(= Gegendruck, bei dem der Kraftstoff verdampft)

P_R = Reid-Dampfdruck des Kraftstoffes bei 37.8°C in kg/cm²

Für Kraftstoffe mit verschiedenem Reid-Dampfdruck P_R läßt sich also ein Schaar paralleler Geraden aufzeichnen, wenn man den $\log P$ als Ordinate und die Temperatur t als Abszisse nimmt (siehe Tafel 2). Z.B. wird bei 20°C ein Kraftstoff mit $P_R = 0.5$ kg/cm² bei einem Gegendruck von 0.32 kg/cm² zu verdampfen beginnen, ein Kraftstoff mit $P_R = 0.2$ kg/cm² aber erst bei einem Gegendruck von 0.13 kg/cm², also in entsprechend größerer Höhe.

Für Normaldruck $P = 1.033$ kg/cm² ergibt sich aus Formel (8):

$$t = 36.4 - 77.8 \log P_R \quad (9)$$

Die Gleichung (9) ist nichts anderes als eine Beziehung zwischen dem 10%-Punkt der Siedekurve und dem Reid-Dampfdruck; d.h. die Temperatur t ist in diesem Falle identisch mit dem 10%-Punkt. (Auch in Gleichung (3b) ist $t = t_0$, wenn $P = P_0$ wird).

Wenn man für t die Normalsiedetemperatur bei 760 mm Hg einsetzt, gilt Gleichung (9) auch für einheitliche Kohlenwasserstoffe und sogar für solche, die Sauerstoff enthalten, z.B. Äthyläther und Isopropyläther. Es kann sich dabei natürlich um keine ganz exakte Beziehung handeln, wie aus Tafel 3 hervorgeht, in der die Gleichung (9) anhand von 27 verschiedenen Stoffen nachgeprüft wurde. Immerhin ist die Übereinstimmung so gut, daß sie ein wertvolles Hilfsmittel zur Kontrolle der Reid-Dampfdruckbestimmung, die als verhältnismäßig rohe Methode eine Fehlergrenze von etwa 0.04 kg/cm² besitzt, bildet. Außerdem deutet ein merklich über der Kurve liegender Dampfdruck auf das Vorhandensein gelöster Gasemengen, die in normalen Betriebsstoffen unvorwünscht sind, hin. Das scheint z.B. bei dem 6. Kraftstoff der Tabelle auf Tafel 3 der Fall zu sein.

Es wurde nun noch der durch Gleichung (4b) gegebene Wert der Stoffkonstanten A, der nach Bridgeman rd. 4.0 betragen soll, an einer größeren Reihe von Benzinmischungen mit verschiedener chemischer Konstitution und verschiedenen Dampfdrücken nachgeprüft.

Kraftstoff	Dampfdr. Reid ₂ kg/cm ²	10%-Pkt. ASTM °C	$\frac{S}{C}$ pro 1 % Verdampfes	A
Normales B 4	0.48	63.5	0.650	4.21
Normales C 3	0.33	70	1.350	4.02
Intava-Spezial-Benzin	0.20	86	0.670	4.38
C HShenkraftstoff	0.20	84	0.600	4.30
VT 702, b. 50°C abgeschnitten	0.27	75	0.525	4.30
dto. 60°C "	0.22	81	0.450	4.36
DHD-Benzin	0.34	68	0.300	4.14
dto. bei 50°C abgeschnitten	0.25	78	0.700	4.25
" " 55°C "	0.18	85	0.500	4.35
" " 60°C "	0.16	86	0.500	4.36
" " 70°C "	0.09	96	0.500	4.40
" " 80°C "	0.08	100	0.425	4.44

Nach vorstehender Tabelle liegt der Wert für A etwa zwischen 4.0 und 4.4. Wie man aus Gleichung (7) errechnen kann, ergibt sich bezüglich t bei A = 4.0 gegenüber A = 4.4 nur eine Differenz von maximal $\pm 2^\circ\text{C}$. D.h. der von Bridgeman angegebene Wert für A = 4.0 kann mit ausreichender Genauigkeit als allgemein gültig betrachtet werden.

2.) Unterbrechung der Kraftstoffförderung durch Dampfblasenbildung.

Wenn in einer Kraftstoffleitung Dampf- oder Gasblasen auftreten, so kann die Förderung sehr stark nachlassen, also die Motorleistung in gefährlichster Weise herabgesetzt werden. Derartige Blasenbildung findet an der Stelle des Kraftstoffsystems statt, wo die Summe der durch den flüssigen Kraftstoff selbst, durch die in ihm gelösten Kohlenwasserstoffgase, Luft oder Wasser ausgeübten Drücke den Gegendruck überschreiten. Die Blasenbildung setzt um so früher ein, je höher die Kraftstofftemperatur und je niedriger der Gegendruck, unter dem der Kraftstoff steht, ist.

Eine besonders kritische Stelle ist also die Saugleitung der Brennstoff-Förderpumpe, vor allem in größerer Höhe.

Die Lösungsfähigkeit von Wasser in Kohlenwasserstoff-Kraftstoffen ist sehr gering. Sie beträgt z.B. bei 30°C für Bensin etwa 0,01 Gew.%, für Benzol etwa 0,08 Gew.%. Da außerdem der Dampfdruck des Wasserdampfes weit unter dem des Bensins liegt, ist er praktisch zu vernachlässigen.

Die Lösungsfähigkeit von Luft in Kraftstoffen ist dagegen sehr hoch. Sie beträgt z.B. bei 0°C für Bensin 22 Vol.%, für Benzol 15 Vol.%. Enthält ein Kraftstoff Luft gelöst, so wird diese bei Erniedrigung des Druckes frei. Luft kann aber auch schon an sich durch Undichtheiten in die Saugleitung gelangen. Bei Versuchen über die Dampfblasenbildung von Kraftstoffen müssen diese Punkte also sorgfältig beachtet werden. Gelöste Kohlenwasserstoffgase wie Butan, Propan und Pentan sollten in Flugbensinen nur in geringen Mengen vorhanden sein, weil sie die Dampfblasenbildung stark begünstigen. Die Vorschrift, daß der Verlust bei der ASTM-Destillation höchstens 2 % betragen darf, bietet eine gewisse Sicherheit gegen allzu hohen Gasgehalt.

Für die Berechnung der niedrigsten Temperaturen, bei denen unter bestimmten Druckverhältnissen Dampfblasenbildung durch die flüssigen Kraftstoffe selbst einsetzt, gilt die oben entwickelte Formel (8):

$$t = 35.3 + 77.8 \log \left(\frac{P}{P_R} \right) \quad (8)$$

oder, wenn man für P_0 den Normaldruck $\frac{1}{1.033} \text{ kg/cm}^2$ einsetzt, die Formel (3b):

$$t = \frac{4 \cdot t_0 + 275 \log \left(\frac{P}{1.033} \right)}{4 - \log \left(\frac{P}{1.033} \right)} \quad (3b)$$

Die Gleichung (8), bei der ^{der} Reid-Dampfdruck P_R des Kraftstoffes bekannt sein muss, ist allgemein gültig. Die Gleichung (3b), deren Auflösung die Kenntnis des $\log$ -Punktes t_0 der ASTM-Siedekurve erfordert, ergibt nur dann richtige Werte, wenn der Kraftstoff keine gelösten Gase enthält. Wenn letzteres der Fall ist, liegen die kritischen Dampfblausbildungstemperaturen niedriger.

Es ist deshalb für die weiteren Berechnungen nur die Gleichung (8) zugrunde gelegt worden.

Die praktische Richtigkeit der Gleichung (8) ist durch zahlreiche Versuche von Bridgmann selbst und auch durch Höhenflüge bis etwa 6 km bei der 2. Stelle Rechnin für Kolben- und Zahnradpumpen bestätigt worden (vergl. Hangleiter, "Die Kraftstoffförderung in Flugzeugen unter besonderer Berücksichtigung des Höhenfluges", Schlussbericht für Erpr.Nr. 2374

vom 9.2.1938). Hangleiter setzte in seinem Bericht den bei Abreißen der Förderung in der Saugleitung herrschenden Absolutdruck in Beziehung zum Reid-Dampfdruck bei einer bestimmten Temperatur. Er fand bei Flugversuchen, daß der kritische Leitungsdruck um etwa 18 % über dem Reid-Dampfdruck lag. Davon erklären sich 10 % schon durch die von Bridgeman selbst angegebene Beziehung (6): $P_{\max} = 1.1 \cdot P_{\text{Reid}}$. Die restlichen 8 % Abweichung dürften dadurch entstanden sein, daß der Reid-Dampfdruck (bei 57.8 °C) des für die Versuche verwendeten B 4 - Kraftstoffes nicht, wie angenommen, 300 mm Hg = 0.41 kg/cm², sondern etwa 0.44 kg/cm² betrug, ein Unterschied, der noch innerhalb der Versuchsgenauigkeit der Reid-Dampfdruck-Bestimmung liegt. Bei Prüfstandsversuchen unter Höhenverhältnissen wurde ein Unterschied von nur 10 - 12 % festgestellt, der also fast genau der Gleichung (6) entspricht.

Da damit die Richtigkeit der Gleichung (8) genügend bewiesen ist, wurden aus ihr und der Normatmosphäre (Tafel 4) auf Tafel 5 - 7 Diagramme entwickelt, aus denen sich die erreichbaren Flughöhen für Kraftstoffe mit einem Reid-Dampfdruck von 0.5, bzw. 0.4 bzw. 0.2 kg/cm² ablesen lassen. Bei dieser sehr praktischen Darstellung, die ebenfalls von Hangleiter entwickelt wurde, ist auf der Abszisse der in der Saugleitung herrschende Druck aufgetragen. Dieser kann entweder negativ ^{oder positiv} sein; der in der Saugleitung gegenüber der Atmosphäre herrschende Unterdruck wird bestimmt erstens durch den von der Fluglage abhängigen Höhenunterschied zwischen dem Ansaugstutzen der Kraftstoff-Förderpumpe und dem Benzinspiegel im Tank, zweitens von den Durchflußwiderständen und drittens von den Beschleunigungskräften, die z.B. beim Abfangen aus dem Sturzflug oder beim Kurvenflug auftreten. Der Unterdruck kann in ungünstigen Fällen bis 0.3 kg/cm² betragen. In diesen ungünstigen Fälle könnte also überhaupt nur eine Flughöhe von etwa 9 km erreicht werden. (vergl. Tafel 4).

Die heute fast allgemeine Verwendung der Behälterpumpe, die hauptsächlich zur Vermeidung der Dampfblasenbildung in größeren Höhen eingeführt wurde, stellt deshalb einen großen Vorteil dar, weil sie statt eines Unterdruckes nunmehr einen Überdruck in der Leitung zwischen Tank und der am Motor sitzenden Förderpumpe erzeugt. Leider liegen bisher keine Flugmessungen über den in größerer Höhe erzielbaren Überdruck vor; am Boden beträgt er bei den heutigen Behälterpumpen maximal etwa 0.5 kg/cm².

Die im Tank eines abgestellten Flugzeuges bei Sonnenbestrahlung sich einstellende Kraftstofftemperatur kann schon unter deutschen Sommerbedingungen bis 35°C betragen. Unter Tropenverhältnissen dürfte ein Wert

von 50°C durchaus möglich sein. Startet ein Flugzeug mit einem so stark erwärmten Benzin, so kühlt sich erfahrungsgemäß der Kraftstoff beim Steigflug und selbst bei einem längeren Höhenflug nur wenig ab.

Die heute übliche Anwendung der Behälterpumpe ist die, dass man in niedrigen Höhen den Kraftstoff mit der Motorpumpe durch die stillstehende Behälterpumpe hindurchsaugt. Erst in der Höhe wird dann die Behälterpumpe eingeschaltet; sie muß spätestens in Betrieb genommen werden, wenn sich durch Unruhigwerden und Abfallen des Brennstoffdruckmessers die beginnende Dampfblasenbildung anzeigt.

Z.B. würde (vergl. Tafel 5) bei einem B 4-Kraftstoff mit dem maximal zulässigen Reid-Dampfdruck von 0.5 kg/cm² (normalerweise beträgt er nur etwa 0.45 kg/cm²) bei 50°C und einem Saugleitungs-Unterdruck von 0.15 kg/cm² schon in 1 km Höhe Dampfblasenbildung auftreten. Eine Behälterpumpe, die 0.3 kg/cm² Überdruck erzeugt, würde die erreichbare Flughöhe bereits auf 6 km steigern. Bei 0.5 kg/cm² Überdruck ließen sich fast 10 km Höhe erreichen.

Die entsprechenden Werte für den im Dampfdruck um rd. 0.1 kg/cm² niedriger liegenden Kraftstoff C 3 (vergl. Tafel 6) würden bei 2.5 km, bzw. 9 km, bzw. 15 km Höhe liegen.

Mit einem Spezialhöhenkraftstoff mit 0.2 kg/cm² Dampfdruck (vergl. Taf. 7) ließen sich die Flughöhen noch wesentlich weiter und zwar auf etwa 6 km bei 0.15 kg/cm² Saugunterdruck und auf über 20 km bei 0.3 kg/cm² Überdruck steigern.

D.h. durch Kraftstoffe niedrigen Reid-Dampfdruckes und Anwendung von Behälterpumpen mit hohem Förderdruck läßt sich die Dampfblasenbildung in der Kraftstoffleitung eines Flugmotors auch unter den ungünstigsten Betriebsbedingungen mit Sicherheit beherrschen.

3.) Verdampfungsverluste in Flugzeugtanks.

Der zweite wesentliche Gesichtspunkt für die Höhenfestigkeit eines Otto-Kraftstoffes ist der Verdampfungsverlust in den Flugzeugtanks, der die Reichweite beeinträchtigt. Auch hier wird, wenn der wirkliche Dampfdruck des Kraftstoffes den Außendruck überschreitet, ein Aufdampfen des Kraftstoffes stattfinden. Das Verdampfen verursacht, da die verhältnismäßig kleine Entlüftung nur ein allmähliches Abblasen gestattet, einen gewissen Druckstau.

Weiter kühlt sich der Kraftstoff bei der Verdampfung etwas ab. Außerdem bewirkt die Abnahme des Tankinhaltes (Zunahme des Wertes ϕ) durch den Motorverbrauch und den Abblasverlust eine Herabsetzung des wirklichen Dampfdruckes. Schließlich sinkt der Dampfdruck ständig durch das Ver-

dampfen der leichtsiedenden Bestandteile. Diese Einflüsse unterbrechen also immer wieder den Verdampfungsprozeß und sind maßgeblich für die Verluste pro Zeiteinheit.

Zur Ermittlung derjenigen kritischen Flughöhen, ab welchen Kraftstoffverluste durch Verdampfung auftreten, kann man wieder die Tafeln 5-7 heranziehen. Wenn man den ungünstigsten Fall: Tank ganz voll ($\varphi = 0$), Überdruck im Tank = 0, Kraftstofftemperatur = 50°C annimmt, so ergibt sich als kritische Höhe

für B 4 (Reid - Dampfdruck maxim. 0.5 kg/cm^2) = 2.4 km.

für C 3 (Reid - Dampfdruck maxim. 0.4 kg/cm^2) = 4.2 km.

für Höhenkraftstoff (Reid-Dampfdr. 0.2 kg/cm^2) = 9.0 km

Die wirklichen kritischen Höhen werden aus den oben angegebenen Gründen immer etwas höher liegen.

Die oberhalb der kritischen Höhen auftretenden Verdampfungsverluste lassen sich für einen bestimmten Kraftstoff annähernd berechnen, wenn man weiß, wie sich sein Reid-Dampfdruck mit dem Verlust an leichtsiedenden Bestandteilen ändert. Diese Beziehung kann im Laboratorium durch Abdestillieren der leichtsiedenden Bestandteile z.B. mit Hilfe einer Widmer-Spirale ermittelt werden; man erreicht praktisch die gleichen Werte, wenn man die leichten Bestandteile durch Herabsetzung des Gegendruckes verdampfen läßt (vergl. Tafel 10 mit Tafel 13). Die Beziehung zwischen Reid-Dampfdruck und Verdampfungsverlust wurde für 3 Kraftstoffe mit 0.47 , bzw. 0.34 , bzw. 0.2 kg/cm^2 anfänglichem Reid-Dampfdruck bestimmt. (Siehe Tafel 8, gestrichelte Kurven). Mit Hilfe der Gleichung (7) kann man dann ausrechnen, wie groß bei gleichem Verdampfungsverlust der wirkliche Dampfdruck (also der erreichbare Gegendruck) bei verschiedenen Temperaturen wird.

Die so aufgestellten Kurvenscharen in Tafel 8 gelten für den ungünstigsten Fall, d.h. den ganz vollen Tank ($\varphi = 0$). Sie sind also wieder theoretische Höchstwerte, die nie ganz erreicht werden können. Der B 4-Kraftstoff mit anfänglichem Reid-Dampfdruck = 0.47 kg/cm^2 beginnt z.B. bei 50°C bereits unterhalb 3 km zu verdampfen. Der Verdampfungsverlust - ausgedrückt in Gew.% der Gesamt-Kraftstoffmenge - steigt zuerst nur schwach an und beträgt z.B. in 5 km erst 4 Gew. %. Mit steigender Höhe nimmt der Verlust immer rascher zu; in 8 km Höhe beträgt er schon 18 %. Ein Herabsetzen der Kraftstoff-Temperatur beeinflusst den Verdampfungsbeginn ganz erheblich. Bei 10°C z.B. fängt die Verdampfung erst in 11.5 km Höhe an; der Verlust beträgt in 16 km Höhe aber auch schon

001133

wieder 18 %.

Wesentlich besser gestalten sich die Verhältnisse bei dem Kraftstoff mit dem anfänglichen Reid-Dampfdruck = 0.2 kg/cm^2 . Dieser verdampft selbst bei 50°C erst ab 9 km Höhe; in 13 km Höhe ergibt sich aber auch bei ihm schon wieder ein Verlust von 25%. Also selbst ein Kraftstoff mit 0.2 kg/cm^2 Reid-Dampfdruck, (ein Wert, der aus Gründen der Anlaß- und Beschleunigungsfähigkeit kaum mehr unterschritten werden könnte), ist bei extremen Tropenverhältnissen noch nicht "absolut höhenfest". Es ist also zum mindesten für Höhenflugszeuge eine zusätzliche mechanische Einrichtung erforderlich, um Verdampfungsverluste und Qualitätsverschlechterung des Kraftstoffes (siehe später) zu vermeiden oder wenigstens auf ein Mindestmaß herabzusetzen. Z.B. könnte man anstelle der Entlüftung ein Ventil anbringen, daß sich bei dem kleinsten Überdruck schließt und bei dem kleinsten Unterdruck sofort wieder öffnet. Damit entsteht, sobald die kritische Dampfbildungshöhe erreicht ist, ein Überdruck im Tank. Außerdem muß noch ein Sicherheitsventil vorgesehen werden, dessen Öffnungsdruck davon abhängt, welchen Überdruck die betreffende Behälterbauart verträgt. Nach Tafel 8 würde z.B. bei einem Höhenkraftstoff mit Reid-Dampfdruck = 0.2 kg/cm^2 der maximale Überdruck (50°C in 20 km Höhe) rd. 0.25 kg/cm^2 betragen.

Der Überdruck im Tank bringt weitere Vorteile mit sich. Er unterstützt die Wirkung der Behälterpumpe und verhindert das Zusammendrücken der unstarren SC-Behälter beim Sturzflug. Trotzdem ist ein Überdruck in geschützten Behältern, obwohl diese rein festigkeitsmäßig dazu in der Lage sein dürften, bisher grundsätzlich nicht zugelassen worden, weil nach Beschuß zu große Leckverluste bzw. sogar gänzliches Versagen der Abdichtung befürchtet werden. Dagegen ist wieder anzuführen, daß auch heute schon bei großen Tanks mit einer Bauhöhe von z.B. 2 m allein ein Flüssigkeitsdruck von ca. 0.15 kg/cm^2 auf dem Boden ruht und dass beim Fluge in sehr großen Höhen, insbesondere bei schnellem Steigflug, solange ein gewisser Überdruck in einem Flugzeugtank herrscht, bis die Kraftstoffdämpfe durch die verhältnismäßig kleine Entlüftung entweichen sind.

Zur Bestätigung der in Tafel 8 dargestellten rechnermäßigen Verdampfungsverluste in größeren Höhen wurden noch einige Versuche im Laboratorium durchgeführt.

Eine 1-Literflasche wurde zu $\frac{3}{4}$ mit Kraftstoff gefüllt; das Verhältnis φ betrug also zu Versuchsbeginn $\frac{1}{3} = 0.33$. In der Flasche wurde durch Absaugen der Dämpfe mittels einer Vakuumpumpe ein Absolutdruck

von 75 mm Hg = 0.1 kg/cm^2 (entsprechend 16 mm Meereshöhe) aufrecht erhalten. Dann wurde der Verdampfungsverlust nach 1,2 u. 4 Stunden bestimmt, wobei natürlich vor jedem der Versuche frischer Kraftstoff eingefüllt wurde. Als erster Stoff wurde ein einheitlicher Kohlenwasserstoff und zwar Benzol C_6H_6 geprüft. Lag der Dampfdruck des Benzols unter dem Außendruck, so trat nur ein ganz geringer Verdampfungsverlust auf, hervorgerufen durch die Saugwirkung der Vakuumpumpe (siehe Tafel 9 oben). War der Dampfdruck des Benzols aber höher als der Gegendruck, so erfolgte eine starke Verdampfung mit praktisch gleichbleibender Geschwindigkeit bei einem Temperaturabfall bis zu 7°C (siehe Tafel 9 unten). Die Zeit, die für die Verdampfung der gesamten Benzolmenge erforderlich ist, hängt im wesentlichen von der Förderleistung der Vakuumpumpe ab.

Ganz anders verhält sich ein B 4-Kraftstoff mit einem anfänglichen Reid-Dampfdruck = 0.45 kg/cm^2 (siehe Tafel 10). Zuerst setzte wie bei dem Benzol eine stärkere Verdampfung ein. Je mehr sich der Dampfdruck des Kraftstoffes dem Gegendruck näherte, desto mehr ließ die Verdampfungsgeschwindigkeit nach. Nach Tafel 8 müßte der B 4-Kraftstoff bei den gewählten Versuchsbedingungen (Temperatur = 15°C , Gegendruck = 0.1 kg/cm^2) einen theoretischen maximalen Verdampfungsverlust von etwa 30 % haben. Nach Tafel 10 waren nach 4 Std. erst 20 % verdampft. Der Dampfdruck lag aber noch deutlich über dem Gegendruck; d.h. die Verdampfung war tatsächlich noch nicht abgeschlossen und würde, immer langsamer werdend, (nicht ganz) den theoretischen Wert erreichen.

Eine weitere Versuchsreihe wurde mit einem Benzin mit einem anfänglichen Reid-Dampfdruck = ca. 0.2 kg/cm^2 (144 mm Hg) durchgeführt. Dabei lag bei dem ersten Versuch der wirkliche Dampfdruck des Benzins nur um rd. 16 mm Hg über dem Außendruck. Die Benzintemperatur betrug 19.5°C , der Gegendruck 75 mm Hg = 0.1 kg/cm^2 ; nach Tafel 8 müßte dabei ein maximaler theoretischer Verdampfungsverlust von ca. 6 % auftreten. Das Tempo der Verdampfung beträgt nach Tafel 11 oben nur 0.6 % pro. Std., ist also sehr langsam. Setzt man den Gegendruck wesentlich unter den Dampfdruck, so erfolgt wieder zu-erst eine sehr schnelle Verdampfung (siehe Tafel 11 unten). Bei den diesen Mal herrschenden Versuchsbedingungen (Benzintemperatur = 32°C , Gegendruck = 0.1 kg/cm^2) müßte der theoretische Maximalverlust ca. 25 % sein; der nach 4 Stunden gemessene Verlust betrug 19 %. Dieser hat sich also dem theoretischen Werte schon mehr genähert als bei dem ersten Versuch mit B 4 und zwar, weil der Dampfdruck ^{bei Versuchsbeginn} näher am Gegendruck lag.

Die vorstehend beschriebenen Versuche sind eine recht gute Bestätigung der errechneten und in Tafel 8 dargestellten Werte bezüglich der maximal möglichen gesamten Verdampfungsverluste. Sie geben aber über die

Verdampfungsverluste pro Stunde nur dahingehend etwas an, daß diese zuerst sehr hoch sind und, wenn der Dampfdruck des Benzins infolge Verdampfung der leichtsiedenden Bestandteile nur noch wenig über dem Außendruck liegt, immer geringer werden. Praktische richtige Zahlenwerte für den zeitlichen Verlust lassen sich nur durch den Flugversuch gewinnen.

Es ist aber anzunehmen, daß die Verhältnisse in einem Flugzeugtank noch günstiger sind als in der bei den Laboratoriumsversuchen verwendeten Flasche, weil durch die im Verhältnis zum Tankvolumen kleine Entlüftung ein nur langsames Ablassen erfolgen wird. Solange der Dampfdruck des Benzins den Außendruck nicht überschreitet, werden vermutlich gar keine Verdampfungsverluste auftreten. Letzteres wurde praktisch bestätigt durch einen Flugversuch in einer Bf 109 mit Jumo 210 D-Motor. Der verwendete Kraftstoff war ein B 4 - Benzin, dessen Reid-Dampfdruck durch mehrere Höhenflüge auf 0.3 kg/cm^2 herabgesetzt worden war. Den Tank wurde vor dem Flug eine Kraftstoffprobe bei 15°C , eine weitere Probe nach Erwärmung des Tankinhaltes auf 40°C und eine Probe nach dem Flug entnommen, wobei das Benzin noch eine Temperatur von 31°C hatte. Die gesamte Flugzeit betrug 45 Minuten, die erreichte Flughöhe $8500 \text{ m} \approx 0.34 \text{ kg/cm}^2$ Außendruck. Die Untersuchung der 3 Benzinproben ergab folgende Werte:

Benzinprobe	vor dem Flug	vor dem Flug	nach dem Flug
Benzintemperatur $^\circ\text{C}$	15	40	31
Brechung n_D^{20}	1.4039	1.4041	1.4043
Dichte $/15^\circ\text{C}$	0.738	0.738	0.738
Siedebeginn $^\circ\text{C}$	44	44	44
10 % bei $^\circ\text{C}$	72	72.5	72
50 % bei $^\circ\text{C}$	93	94	94
Dampfdruck/Reid(37.8)	0.30	0.27	0.29

Die Analysenwerte sind also praktisch dieselben geblieben. Die Unterschiede in Reid-Dampfdruck liegen innerhalb der ziemlich großen Versuchungenauigkeit dieser Methode. Die Bestimmung der anderen Werte, insbesondere des 10 %-Punktes der ASTM-Siedekurve ist zuverlässiger. Es können also auch keine Verdampfungsverluste aufgetreten sein, obwohl bei einem Reid-Dampfdruck von rd. 0.3 kg/cm^2 und einer Benzintemperatur von 40°C nach Tafel 2 der wirkliche Dampfdruck des Benzins den Außendruck von 0.34 kg/cm^2 bereits erreicht haben mußte.

4.) Höhenkraftstoffe *für Flüge*

Ein Otto-Kraftstoff in großen Höhen muß nach den vorhergehenden Ausführungen möglichst keine gelbsten Kohlenwasserstoffgase enthalten und einen niedrigen Dampfdruck besitzen. Ein niedriger Dampfdruck ist nur durch Entfernung der leichten Kraftstoffbestandteile, also durch Erhöhen der Siedetemperaturen im ersten und mittleren Teil der ASTM-Siedekurve zu erreichen. Damit verschlechtern sich vor allem die Starteigenschaften insbesondere bei Kälte und auch die Beschleunigungsfähigkeit des Motors beim Gasgeben.

Die tiefsten Anspring-Temperaturen der Vergasermotoren, abhängig vom 10%-Punkt der ASTM-Siedekurve und dem Kraftstoff-Luft-Gemisch, ergeben sich aus Tafel 12. Danach würde z.B. ein B4-Kraftstoff, für den als schlechtester Wert ein 10%-Punkt von 70°C vorgeschrieben ist, bis zu -15°C herab ein Anspringen des Motors ermöglichen. Setzt man den Dampfdruck auf 0.2 kg/cm^2 herab und damit nach Tafel 3 den 10 %-Punkt auf 83°C herauf, so würde die kritische Anlastemperatur bei -6°C liegen.

Allerdings dürften die Verhältnisse beim Einspritzmotor günstiger liegen. Außerdem ließe sich diese Temperaturspanne zweifellos durch besondere Starthilfsmittel, insbesondere durch Verwendung des Fl.-Anlaßkraftstoffes oder bei extrem tiefen Temperaturen durch den bei der E-Stelle Reclin E 3 a entwickelten Acetylongas-Start Überbrücken. Der Motor muß bei einem Kraftstoff niedrigen Dampfdruckes eben etwas länger mit dem Anlaß-Brennstoffen betrieben, bzw. so oft angelassen werden, bis die Zylinder so war, geworden worden sind, daß auch der Betriebsstoff ein zündfähiges Gemisch bilden kann.

Der heutige Fl.-Anlaßkraftstoff hat, wenn nicht durch unzuverlässige Lagerung Verdampfungsverluste aufgetreten sind, einen 10%-Siedepunkt von mindestens 34°C . Nach Tafel 12 entspricht das einer Anlaß-Temperatur bis zu -40°C . Durch Versuche bei der E-Stelle Reclin E 3 a, (Schmachtenberg "Anlassen bei polarem Klima", Teilbericht 22 für Krpr. Nr. 2427 vom 5.3.1942) wurde praktisch gezeigt, daß mit Fl.-Anlaßkraftstoff die verschiedensten Vergaser- und Einspritz-Flugmotoren bis -35°C anspringen, wenn die mechanischen Einrichtungen für seine Einbringung und Verneblung gut arbeiten. Dabei würde höchstens 5 mal Fl.-Anlaß-Kraftstoff bis zum Anspringen mit Hilfe von Verneblerdüsen eingespritzt. Da schon bei dem Kraftstoff C 3 und besonders bei Höhenkraftstoffen mit niedrigem Dampfdruck die Verdampfungsverhältnisse ungünstiger als bei B 4-Kraftstoff liegen, empfiehlt es sich, die Einspritzung des Anlaßkraftstoffes direkt durch die Einspritzpumpe vorzunehmen und den Motor solange da-

mit zu betreiben, bis auch der Betriebsstoff einwandfrei mündet. Das bedeutet natürlich einen wesentlich größeren Bedarf an Fl.-Anlasskraftstoff und vorschriftsmäßigen Transportbehältern als bisher.

Im folgenden wurde nun untersucht, ob sich ein Spezial-Höhenkraftstoff aus den bisher üblichen Kraftstoffarten B 4 und C 3 herstellen läßt.

Auf den Tafeln 13 - 15 ist dargestellt, wie sich die Analysendaten eines B 4-Kraftstoffes (VT 702), insbesondere der Reid-Dampfdruck, das Siedeverhalten und die Oktanzahl ändern, wenn man die leichtsiedenden Bestandteile abdestilliert. Um einen Reid-Dampfdruck von 0.2 kg/cm^2 zu erreichen, müßten weit über 20 % leichte Bestandteile entfernt werden. Dabei nimmt die Oktanzahl mit und ohne Blei sehr stark ab, weil bei diesem Kraftstofftyp die leichten Bestandteile am klopfbestesten sind. Aus dem Kraftstoff B 4 ließe sich also ein Höhenkraftstoff nur gewinnen, wenn man durch das Abdestillieren der leichten Bestandteile hervorgerufene Klopfestigkeitsminderung durch Zusatz hochklopfester Kraftstoffe niedrigen Dampfdruckes, z.B. Isooktan oder Aromaten, wieder ausgleicht; eine Erhöhung des Bleigehaltes über den heute üblichen Wert von 0.12 % kommt nicht infrage.

Wie übrigens noch aus Tafel 13 hervorgeht, findet, wenn ein B 4-Kraftstoff in großer Höhe teilweise verdampft, eine Anreicherung des Bleigehaltes statt. Trotzdem sinkt die Oktanzahl ab. Diese Qualitätverschlechterung ist ein Grund mehr, um größere Ausdampfverluste bei Höhenflügen, wie oben vorgeschlagen, durch Tankventile zu verhindern. Dieselben Untersuchungen wurden für DHD-Benzin (Hauptbestandteil von C 3-Kraftstoffen) durchgeführt. Die Ergebnisse enthalten die Tafeln 16 und 17. Bei diesem Kraftstoff braucht man nur rd. 15 Vol.-% leichte Bestandteile abdestillieren, um einen Reid-Dampfdruck von 0.2 kg/cm^2 zu erhalten. Bis dahin ändert sich auch die Oktanzahl nicht. Destilliert man noch mehr ab, so nimmt die Oktanzahl sogar zu. D.h. bei dem DHD-Benzin sind im Gegensatz zu dem Kraftstoff B 4 besonders die höher siedenden (aromatischen) Anteile die Träger der Klopfestigkeit.

Es wurde nunmehr auf Veranlassung von GL/A-4 II C (Dr. Beyer) ein Höhenkraftstoff folgender Zusammensetzung hergestellt:

- 70 Vol.-% DHD - Benzin (bei 52°C abgeschnitten)
- + 20 Vol.-% ET 110
- + 10 Vol.-% Rybol
- + 0.10 Vol.-% Bleitetraäthyl

Die wichtigsten Analysendaten dieses Kraftstoffes enthält Tafel 18, wo vergleichsweise auch die bisherigen Kraftstoffe B 4 und C 3 mit aufge-

führt sind. Die Klopfestigkeitsprüfung nach dem Überladeverfahren ist ebenfalls im Vergleich zu B 4 und C 3 auf Tafel 19 und 20 dargestellt. Die Klopfestigkeit ist trotz des niedrigen Bleigehaltes außerordentlich gut. Der Zusatz von Kybol, der also nicht unbedingt erforderlich ist, erhöht den letzten Teil der Siedekurve und den Endsiedepunkt auf etwa 180°C . Jedoch bestehen hinsichtlich der Schmierölverdünnung gegen einen Endsiedepunkt bis zu 185°C heute keine Bedenken mehr, nachdem bei den in dieser Hinsicht früher empfindlichen flüssigkeitsgeköhlten Einspritzmotoren die Einspritzdüsen verbessert und Kühlstoff-Thermostaten verwendet werden.

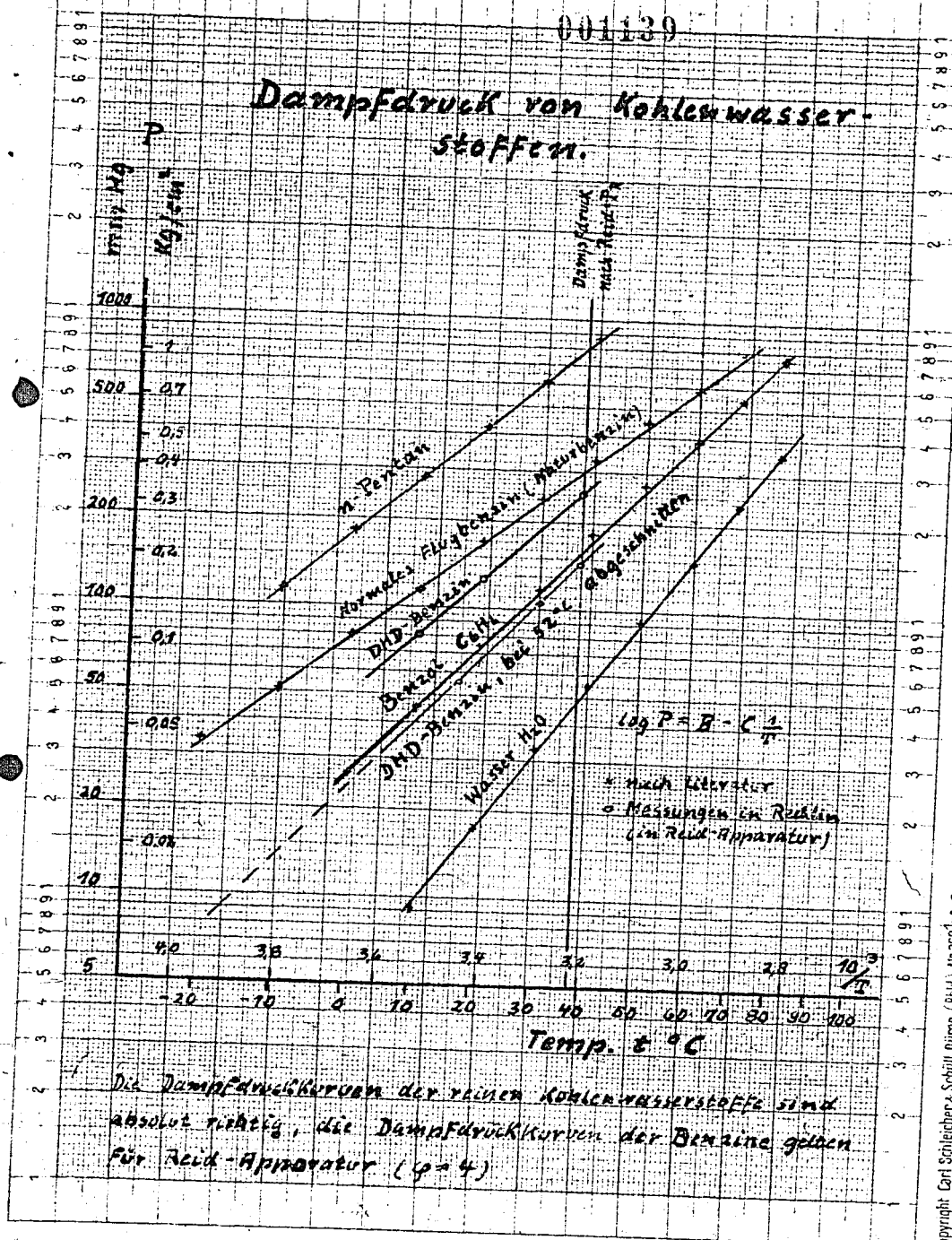
Praktische Versuche mit vorstehendem Höhenkraftstoff konnten bisher nicht durchgeführt werden, da er im Rechliner Laboratorium nur in kleinen Mengen hergestellt werden kann.

Jedoch wurden in Rechlin schon vor mehreren Jahren mit einem von der Intava gelieferten, aus Erdöl hergestellten Spezial-Höhenbenzin (Reid-Dampfdruck = 0.2 kg/cm^2 , Oktanzahl = 87.5, Siedekurve siehe Tafel 14) gewisse Erfahrungen gesammelt; so wurden z.B. einige Höhenflüge allerdings nur bis 9 km durchgeführt, die im wesentlichen die Richtigkeit der Tafel 7 bestätigen. Die Verwendung des Kraftstoffes während des Winters ergab - in Verbindung mit Fl.-Anlasskraftstoff - keine besonderen Startschwierigkeiten.

Es wird empfohlen, dass GL/A-II bei der I.G. Farbenindustrie einen Höhenkraftstoff mit 0.2 kg/cm^2 Reid-Dampfdruck erstmalig in einer Menge von etwa 10 000 Liter für weitere praktische Versuche in Rechlin herstellen lässt. Der Endsiedepunkt sollte bis auf 200°C heraufgesetzt werden, um die erstrebte Verwendbarkeit der höher siedenden, sehr klopfesten Aromaten gleich mitzuprüfen.

001139

Dampfdruck von Kohlenwasserstoffen.



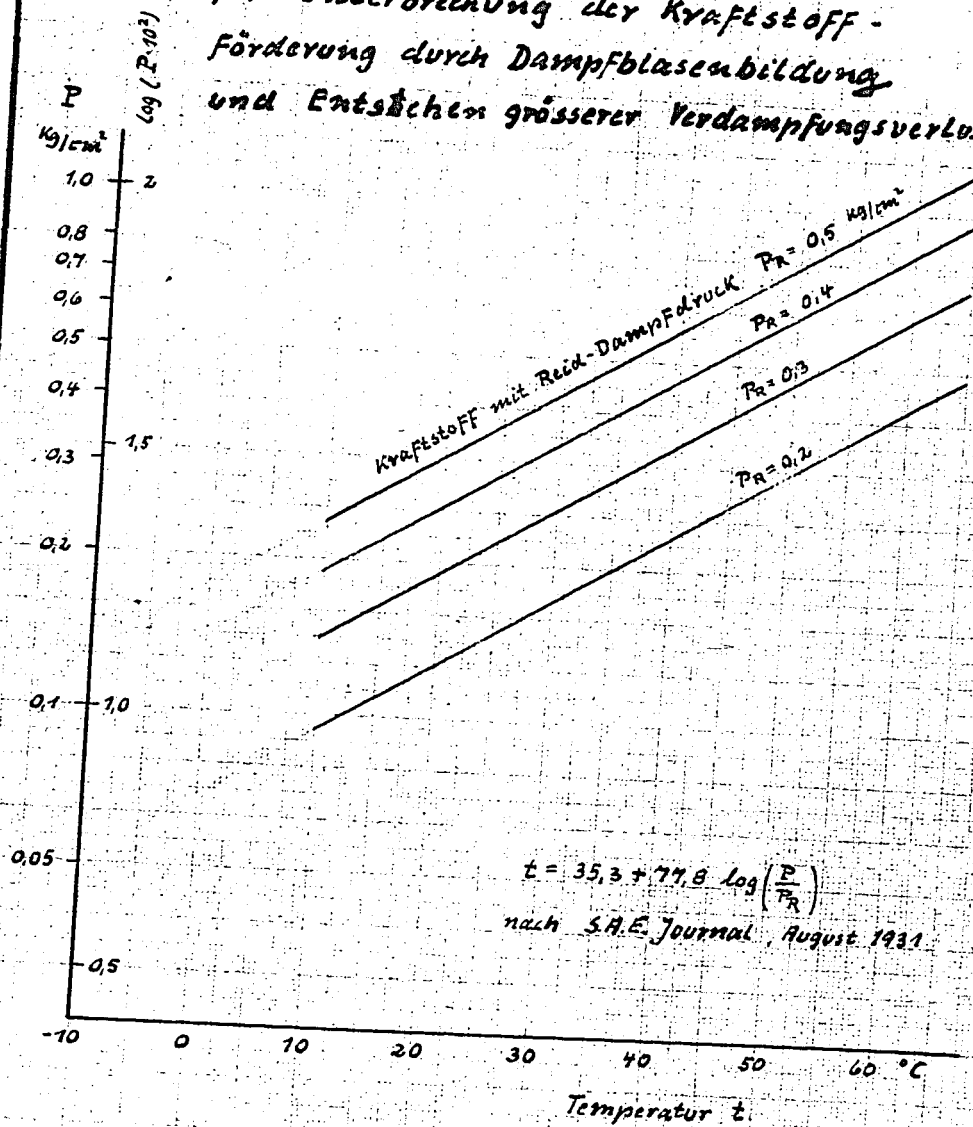
Eine Achse logarithmisch von 1 bis 10000, Einheits 12,5 mm, die andere in mm.

001140

Tafel 2.

Blatt 19

Kritische Drücke, bzw. Temperaturen
für Unterbrechung der Kraftstoff-
Förderung durch Dampfblasenbildung
und Entstehen grösserer Verdampfungsverluste.



Nachdruck oder unbetugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

Gruppe

Bearbeiter

Tag

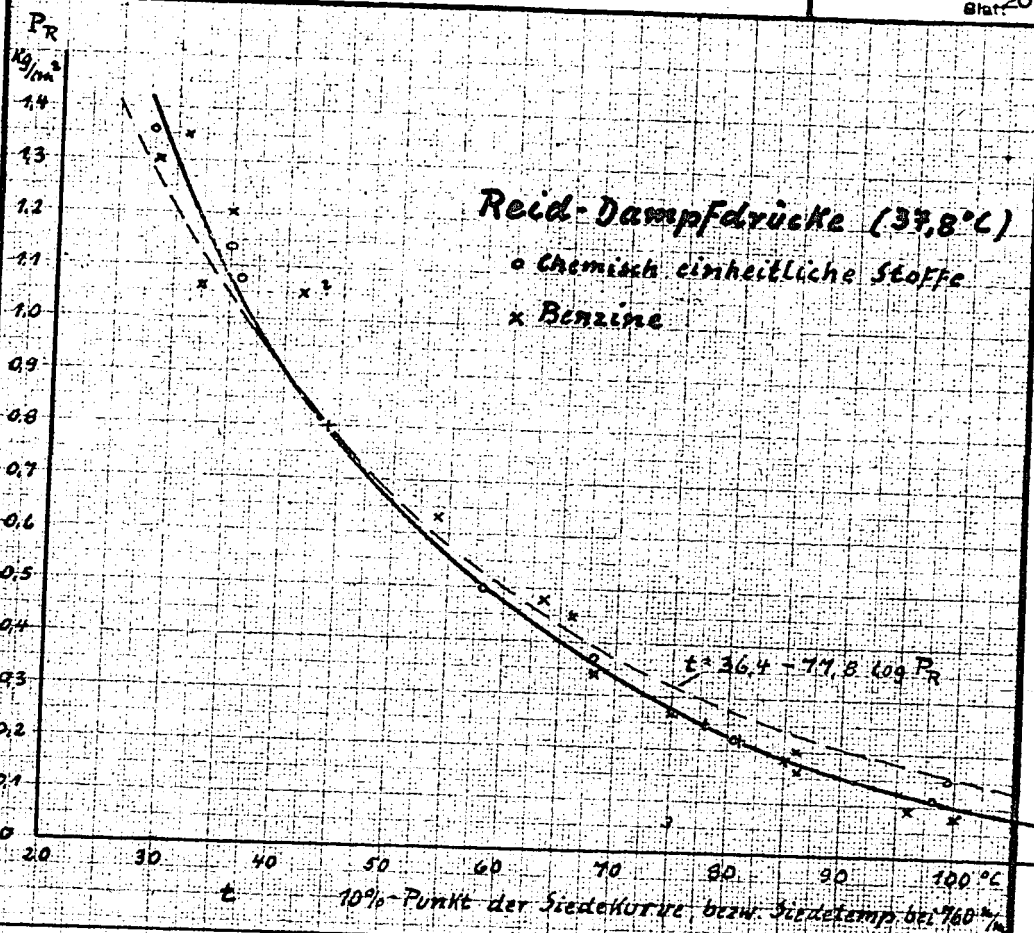
2000 2 81 Millimeter Scale with Grid

Erfindung: Berlin, Ed. 1931

001141

Tafel 3.

Blatt 20

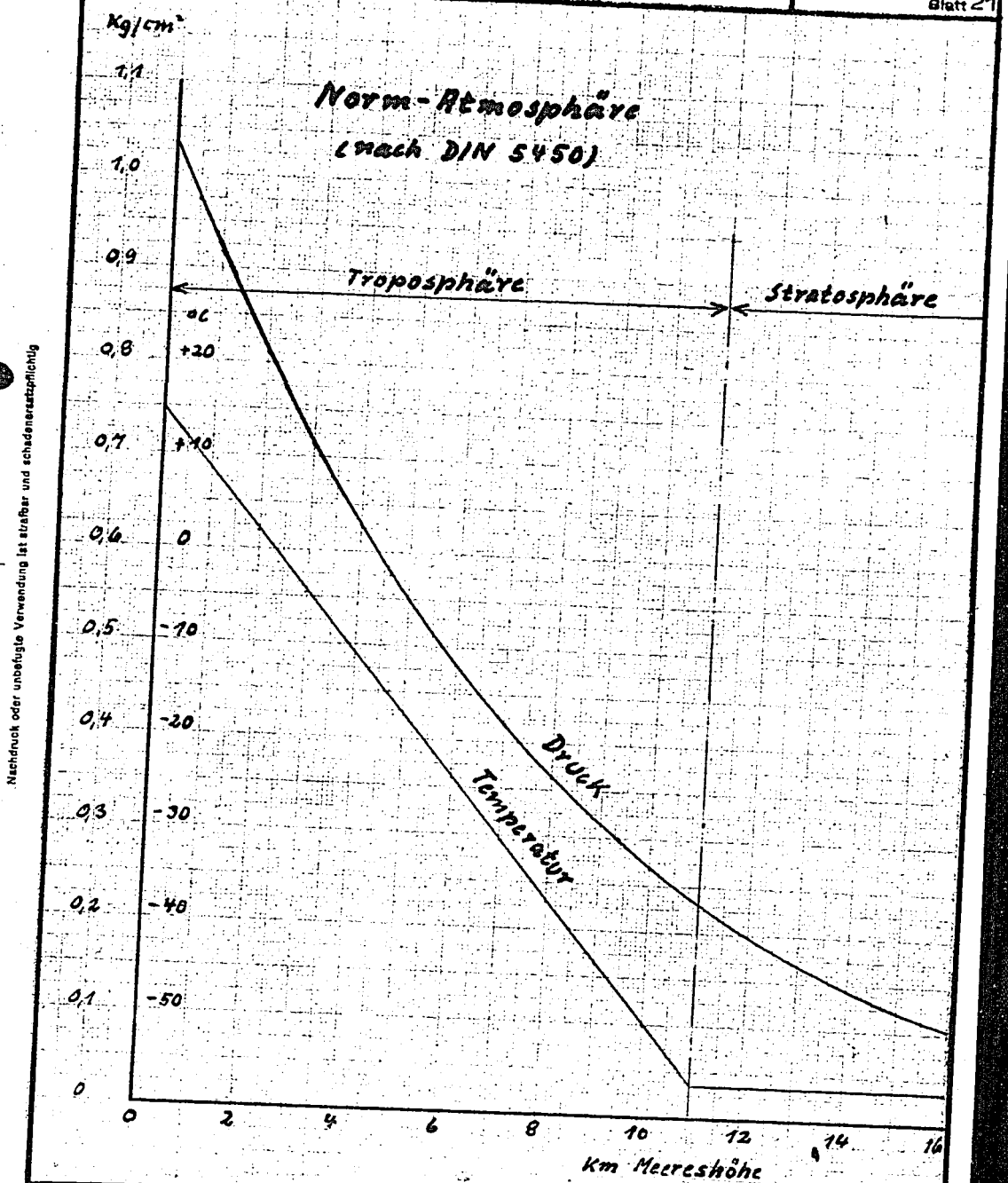


Stoff	10% Pkt. bzw. Siedetemp.	Reid- Dampfdr.	Stoff	10% Pkt. bzw. Siedetemp.	Reid- Dampfdr.
Isopentan	28°C	1,36	Hexan C ₆ H ₁₄ (Dilsapentyl)	59°	0,50
Intiva-Anlass-Benzin (+8% Öl)	31	1,35	Benzol C ₆ H ₆	80,5	0,22
dto.	28,5	1,30	n-Heptan	98	0,11
Shell-Anlass-Benzin (+4% Öl)	35	1,20	Toluol	111	0,08
dto.	32,5	1,06	DHD-Benzin, 0,50° abgez. u.	78	0,25
Leuna-Anlass-Benzin (+4% Öl)	41,5	1,05	dto. 55°	85	0,18
Äthyläther	35	1,14	dto. 60°	86	0,16
Olex-Anlass-Benzin	44	0,80	dto. 70°	96	0,09
Leuna-Anlass-Benzin 2 (+4% Öl)	54	0,63	dto. 80°	100	0,08
VT 702	63,5	0,43	VT 702, bei 50° abgez. u.	75	0,27
Stannav A2	66	0,45	dto. 60°	81	0,22
DHD-Benzin	68	0,34	Intiva-Special-Benzin	86	0,20
Isopropyläther	68	0,37	n-Pentan	36	1,08
Gruppe	Bearbeiter	Tag	360°C	8,15	

001142

Tafel 4.

Blatt 21



Gruppe	Bearbeiter	Tag		
--------	------------	-----	--	--

2000 2. 41 Millimeter-Stammblatt Größe A4

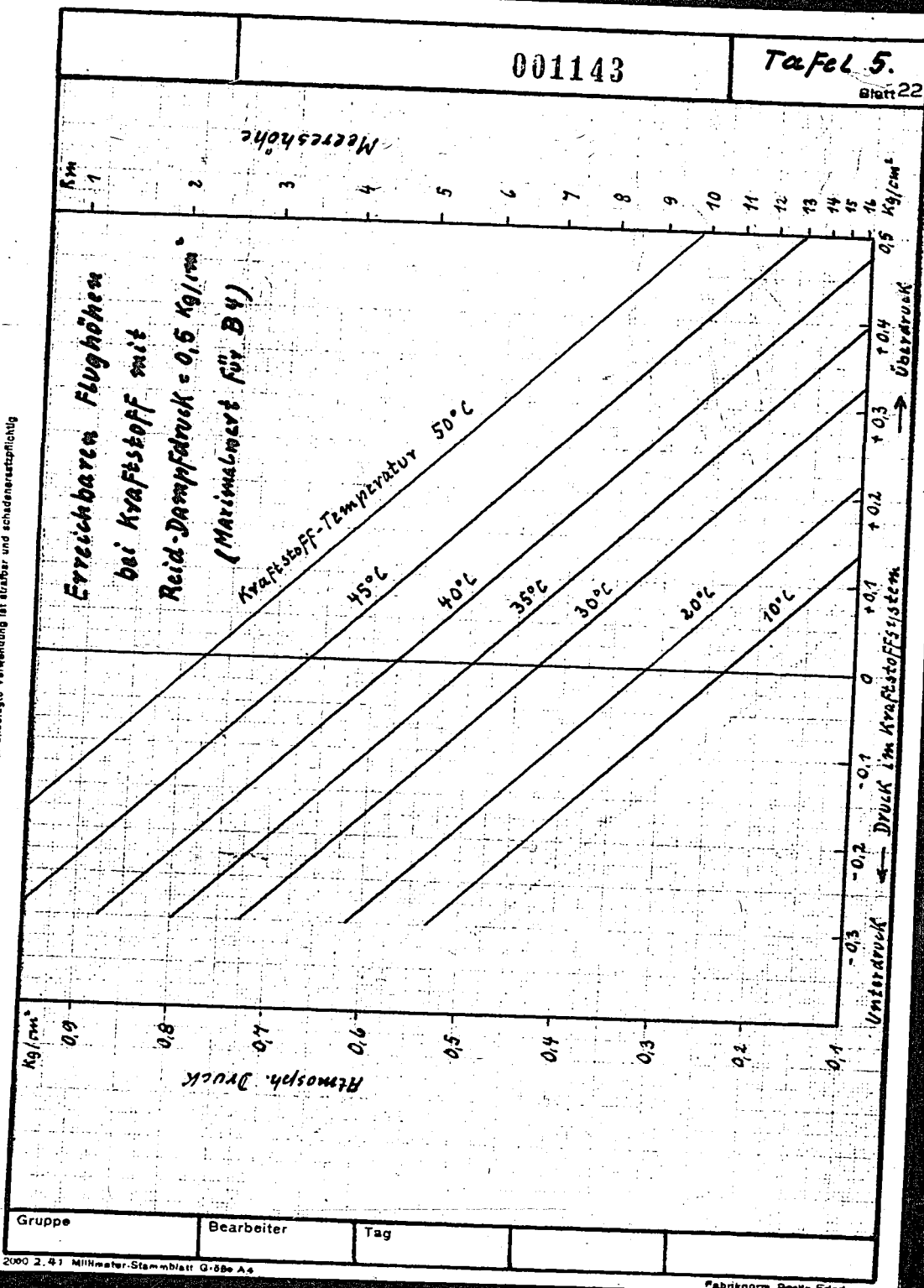
Fabrikname Berlin-Friedenau

Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

001143

Tafel 5.

Blatt 22

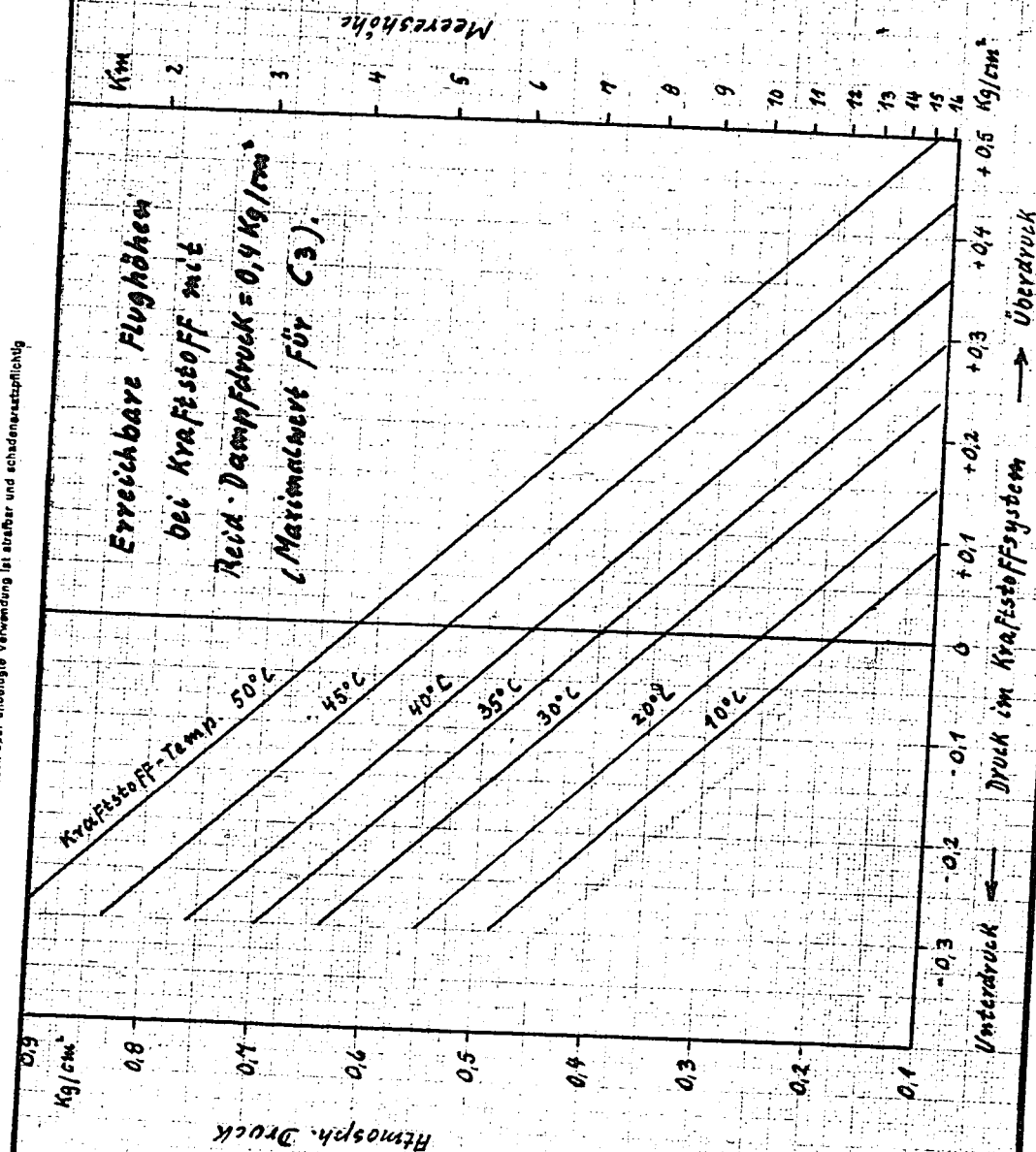


Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

Nachdruck oder unbelegte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

001144

Tafel 6.
Blatt 23



Gruppe

Bearbeiter

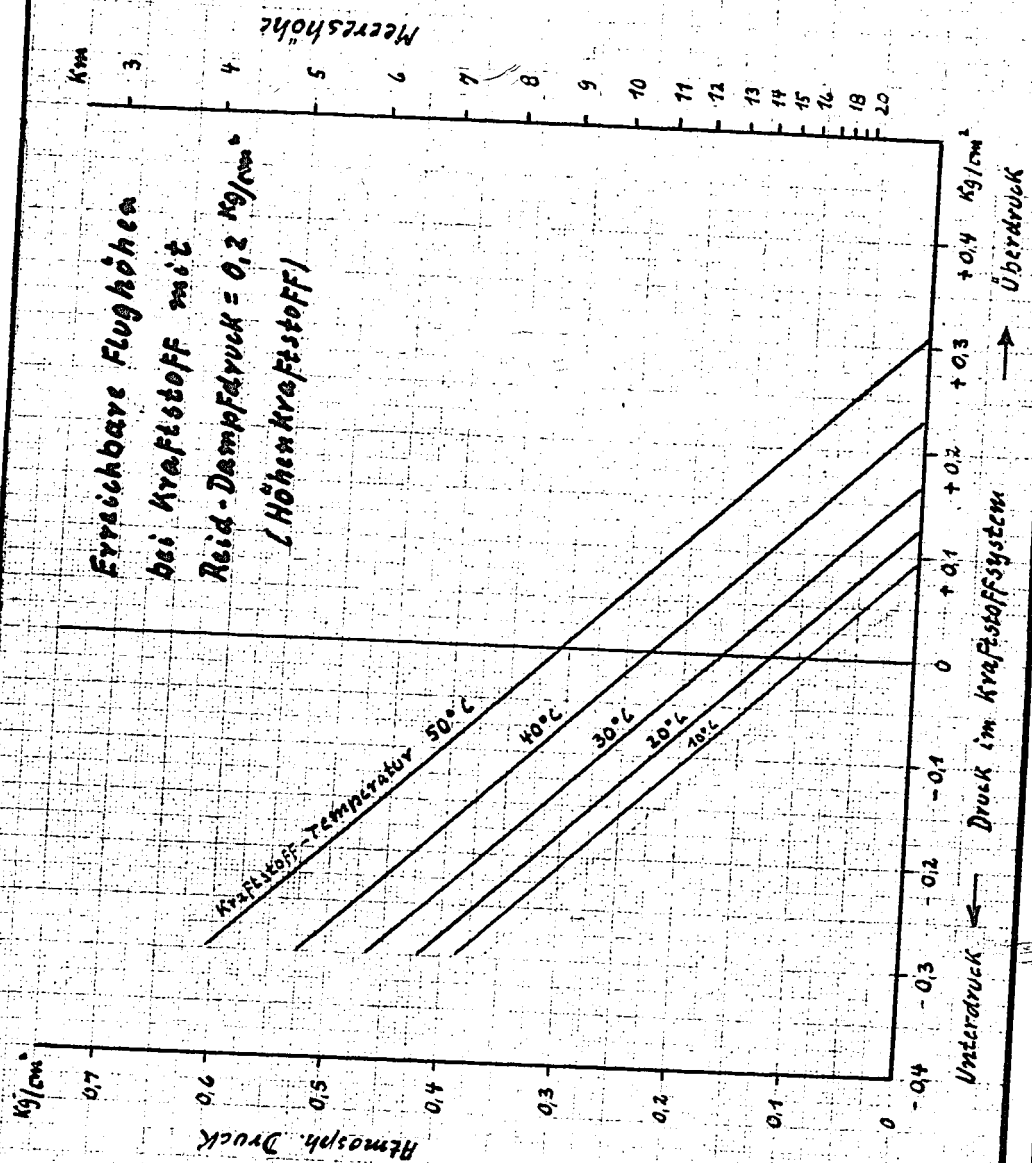
Tag

Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

001145

Tafel 7.

Blatt 24



Gruppe

Bearbeiter

Tag

200 2 81 Millimeter Standard-Druck

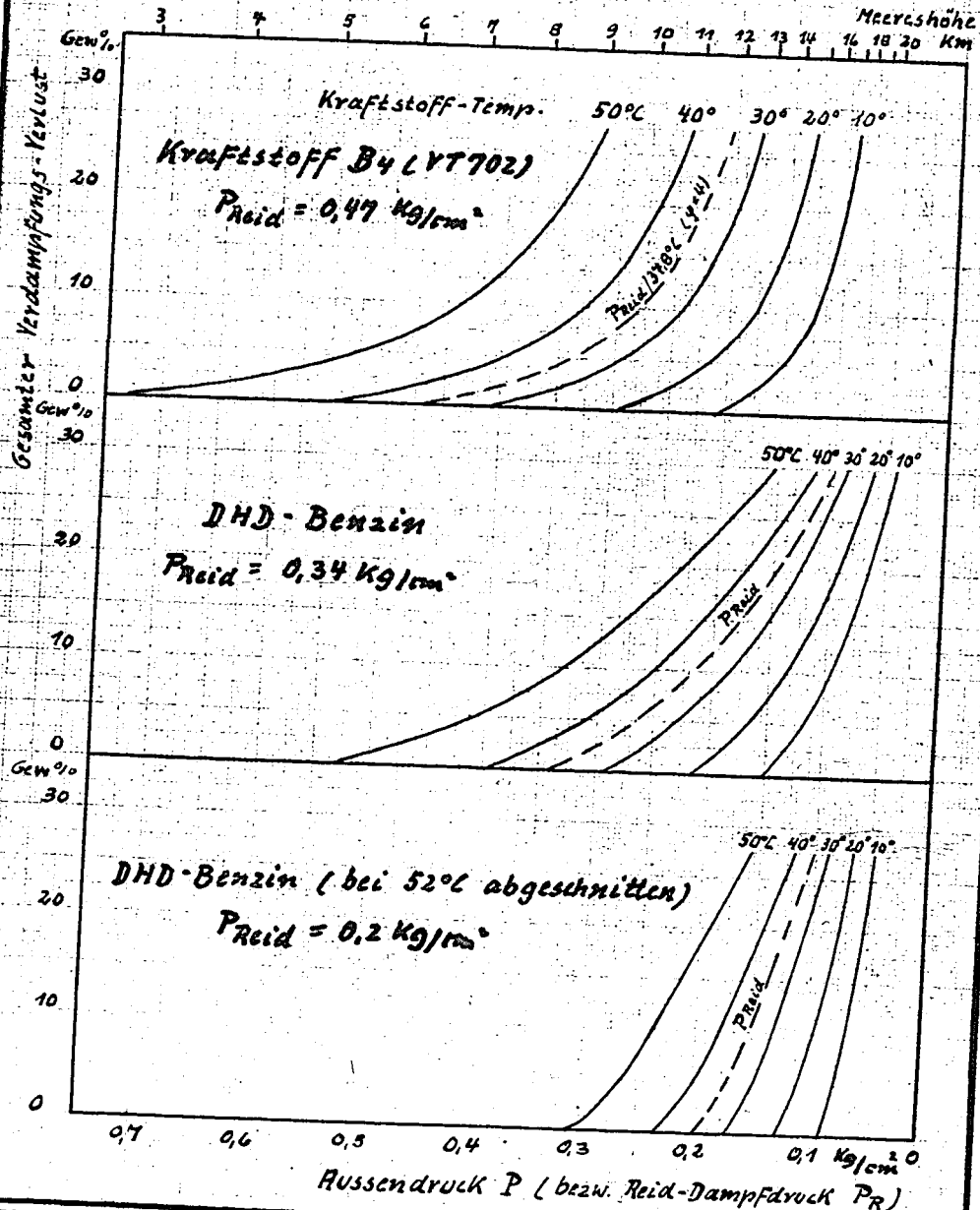
Verfahren, Druck, Folien

001146

Tafel 8.

Blatt 25

Theoretische maximale Verdampfungsverluste in Flugzeugtanks ($\gamma=0$).



Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

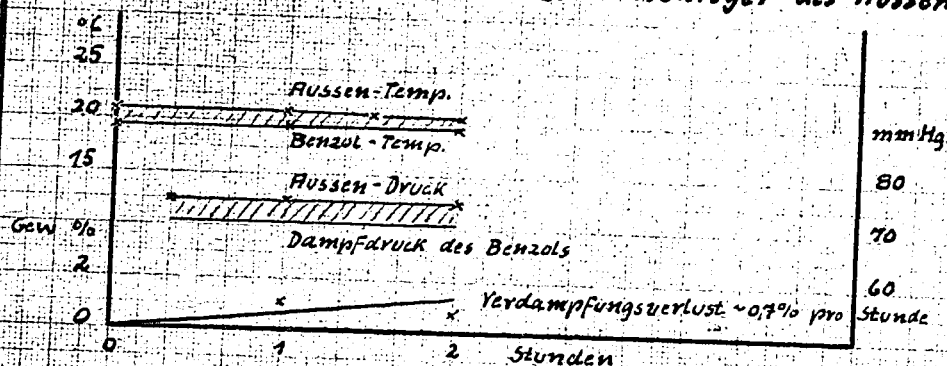
Gruppe

Bearbeiter

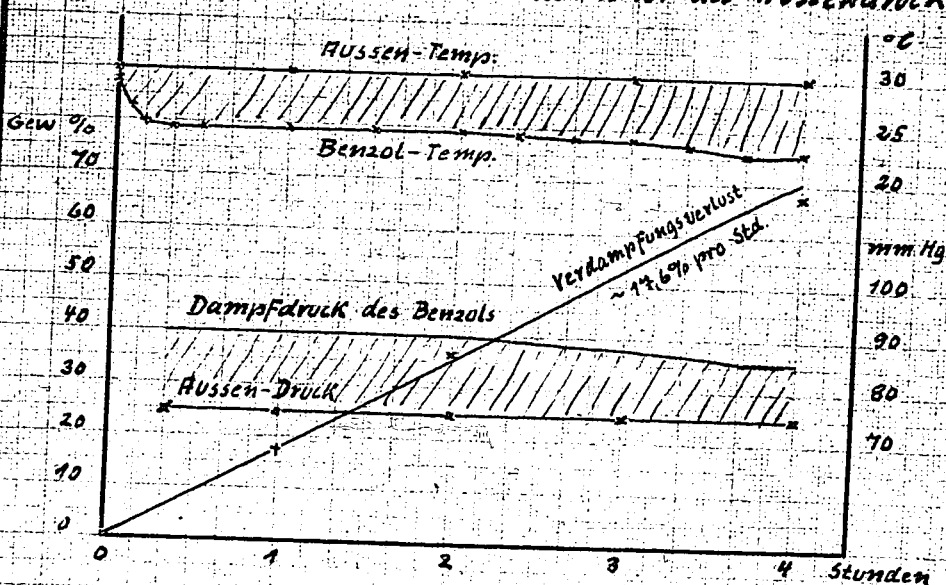
Tag

Verdampfungsverluste bei niedrigem Druck.
Kraftstoff: Benzol C_6H_6 .

1.) Dampfdruck des Benzols niedriger als Aussendruck.



2.) Dampfdruck des Benzols höher als Aussendruck.



Benzol: $d_{15} = 0.886$, $n_D^{20} = 1.5015$, constant für alle Versuchspunkte.

Gruppe E3c3

Bearbeiter Nemec

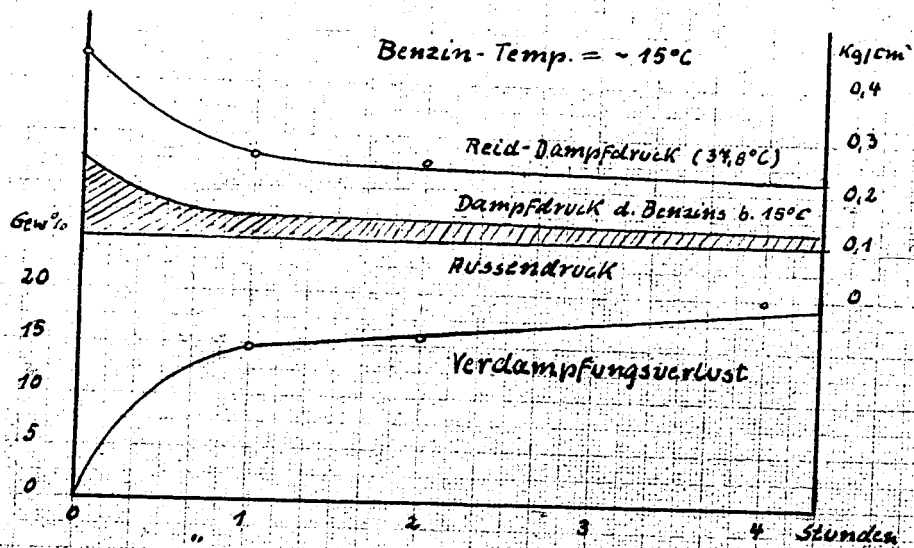
Tag

001148

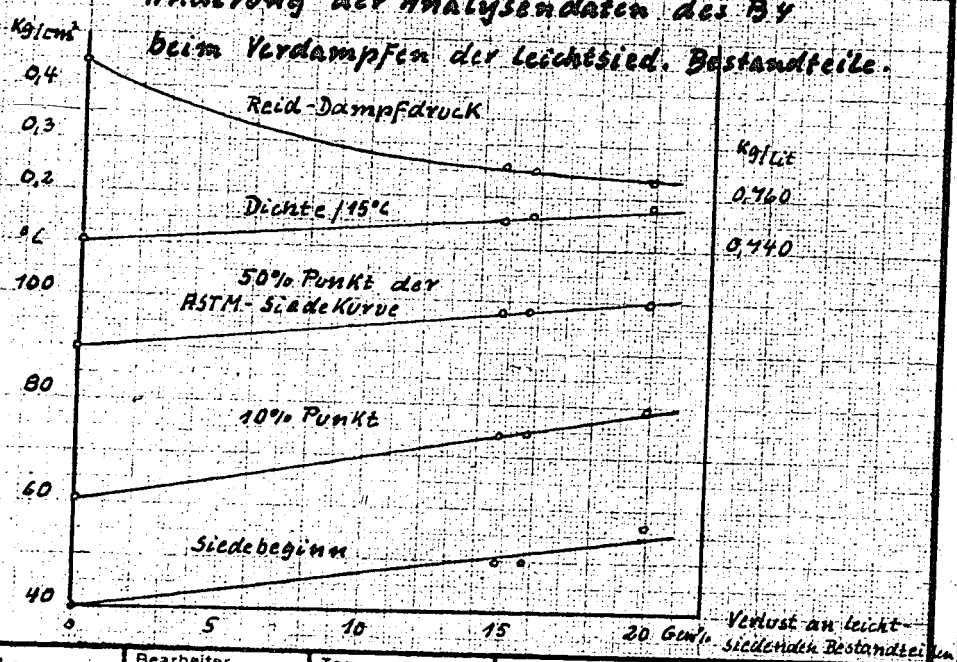
Tafel 10.

Blatt 27

Verdampfungsverluste bei niedrigem Druck.
Kraftstoff: B4 (vom L.T.L. Ebnen)



Änderung der Analysendaten des B4
beim Verdampfen der leichtsied. Bestandteile.



Gruppe E3C3

Bearbeiter Nemes

Tag

2000 2, 41 Millimeter-Stammblatt G.88a A4

Fabriknorm Berlin-Erdener

001149

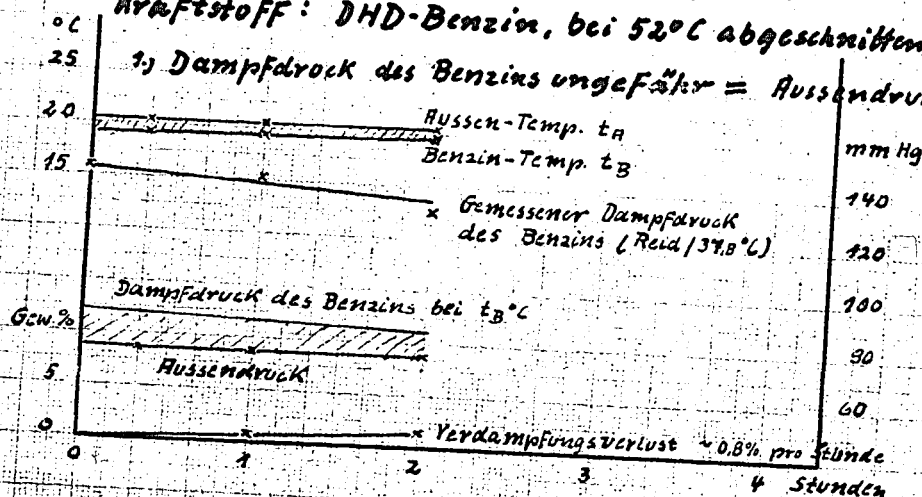
Tafel 11.

Blatt 28

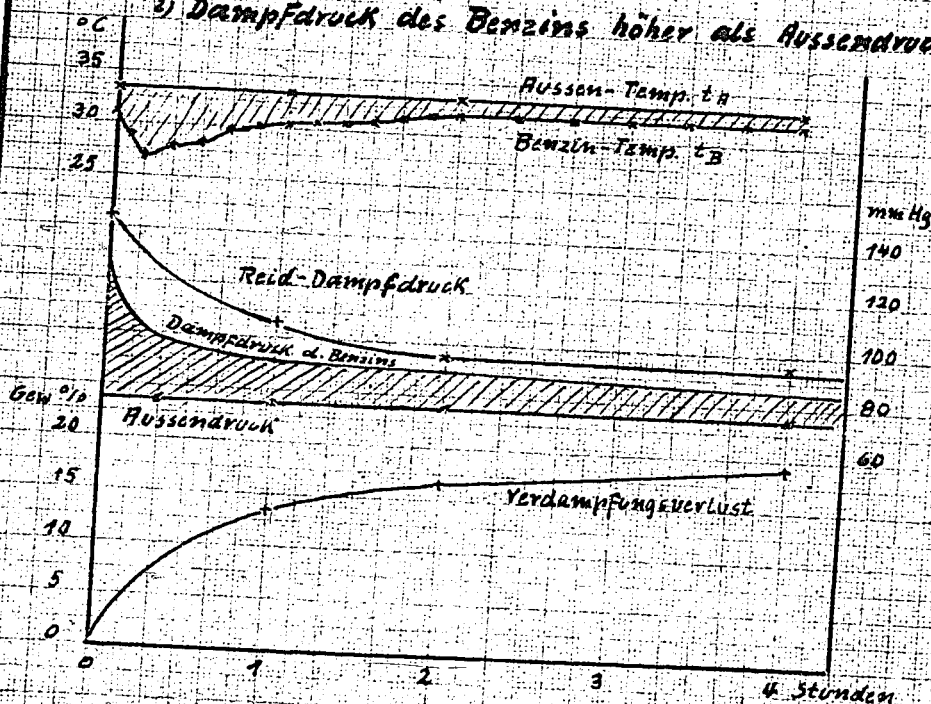
Verdampfungsverluste bei niedrigem Druck.

Kraftstoff: DHD-Benzin, bei 52°C abgeschnitten.

1) Dampfdruck des Benzins ungefähr = Aussendruck.



2) Dampfdruck des Benzins höher als Aussendruck.



Gruppe E 3 C 3

Bearbeiter
NEMEC

Tag

2000 2 41 MINIMETER-Stemmbahn G150a A4

Feldknoten Berlin-Edenau

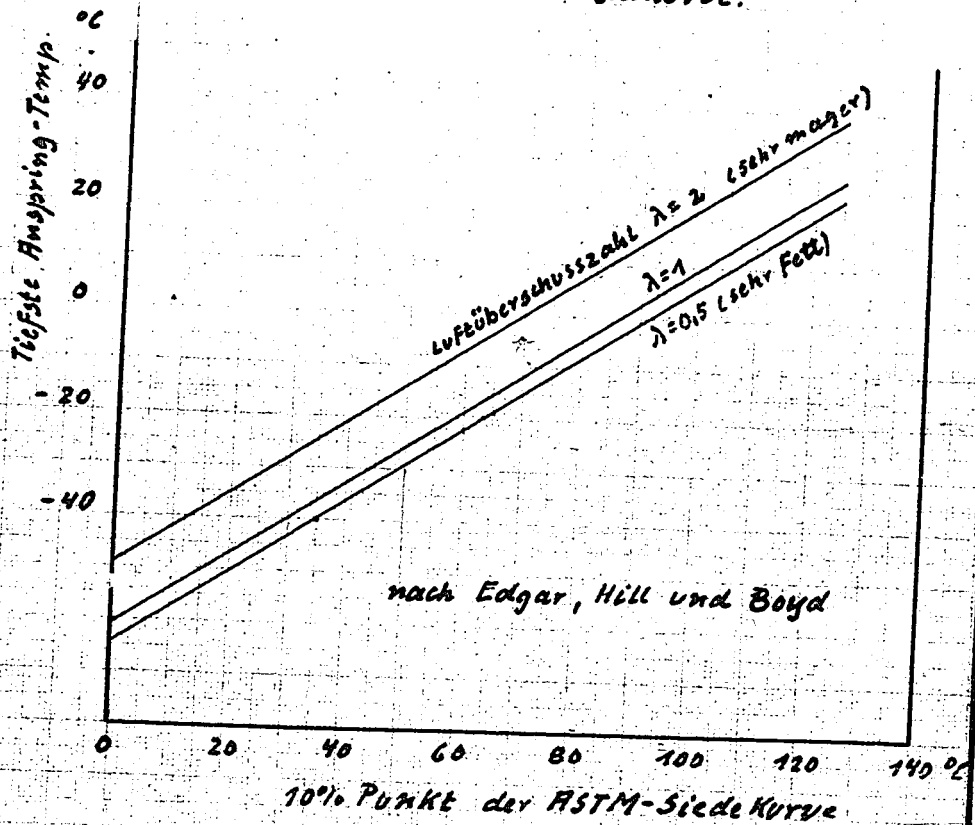
Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

001150

Tafel 12.

Blatt 29

Tiefste Ansprng-Temperaturen von
Vergasermotoren, abhängig vom
10% Punkt der ASTM-SiedeKurve.



Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

Gruppe

Bearbeiter

Tag

2000 2.41 Millimeter, Stammblatt G.80, A4

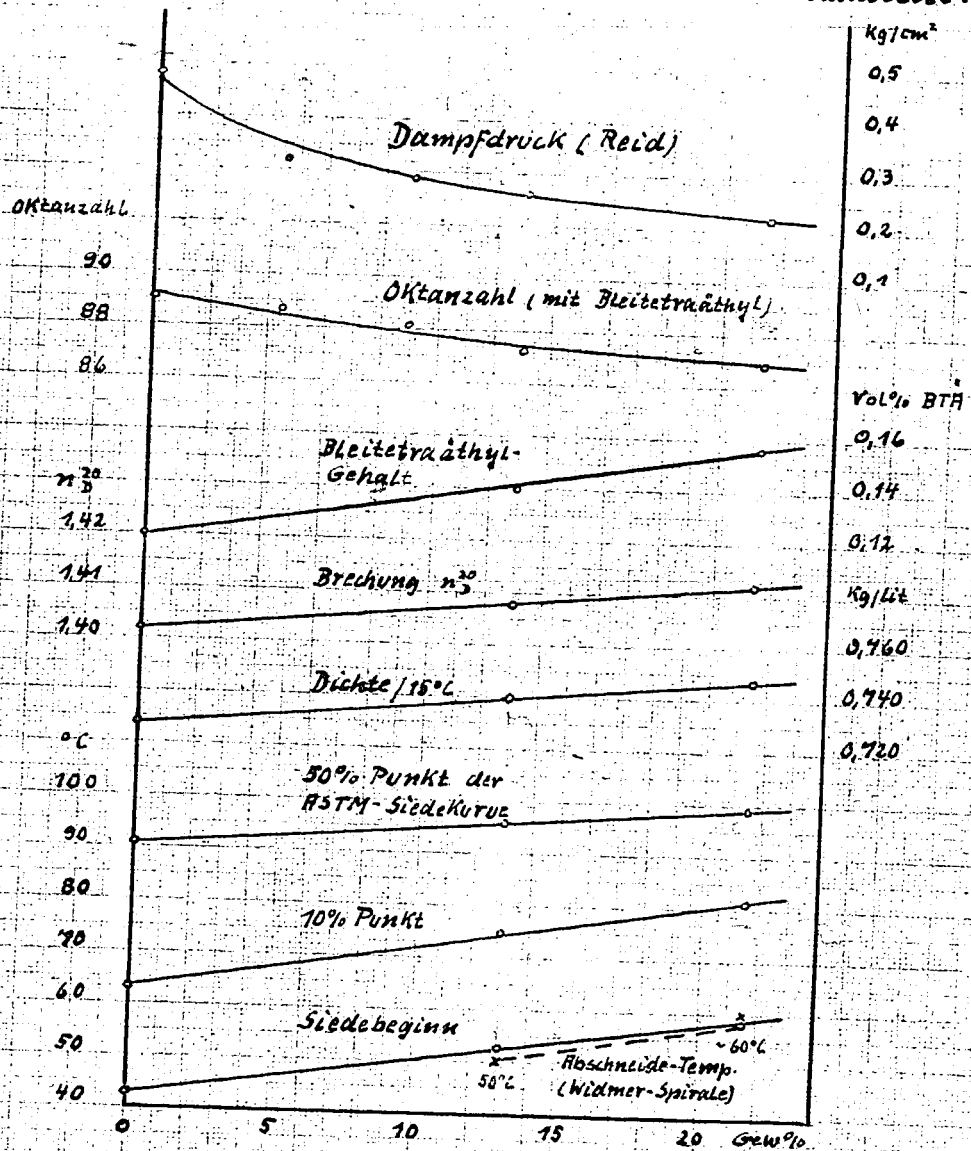
Fabrikat: Berlin-Erdmann

001151

Tafel 13.

Blatt 2

"Änderung der Analysendaten von VT 702-Benzin
bei Abschneiden der leichtsiedenden Bestandteile.



Verlust an leichtsiedenden Bestandteilen

Gruppe E3C3

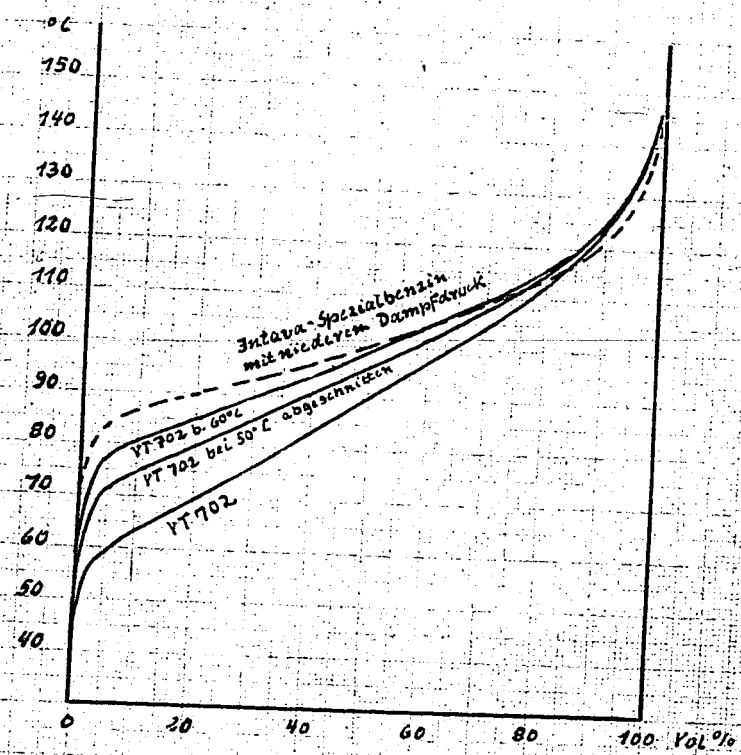
Bearbeiter H. Meier

Tag

Fabriknorm Berlin-Friedenau

Nachdruck oder unbedingte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

ASTM-Siedekurven von VT 702-Benzin
nach Abschneiden der leichtsiedenden Bestandteile.



Gruppe E363	Bearbeiter Nemer	Tag		
--------------------	-------------------------	-----	--	--

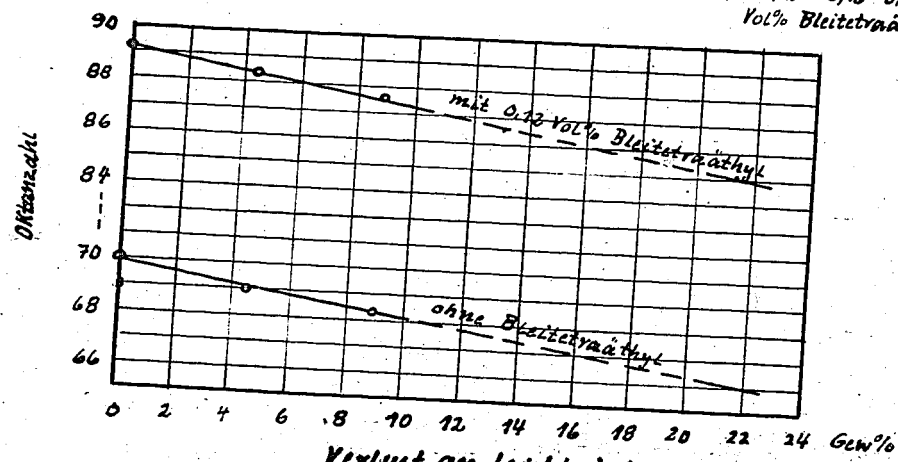
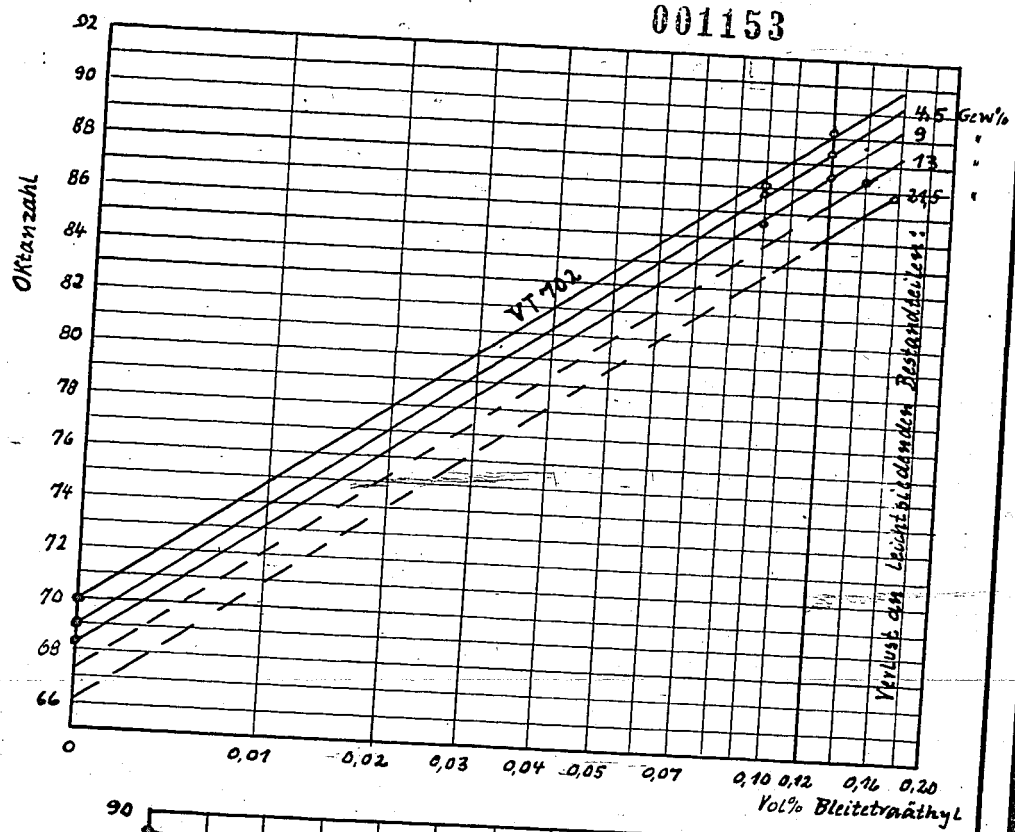
Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

Oktanzahlen von VT 702 nach
Abschneiden d. leichtsied. Bestandteile.

Tafel 15.

Blatt 32

001153



Verlust an Leichtsiedenden Bestandteilen.

Gruppe
E361

Bearbeiter
Stärke

Tag

4.07 5000

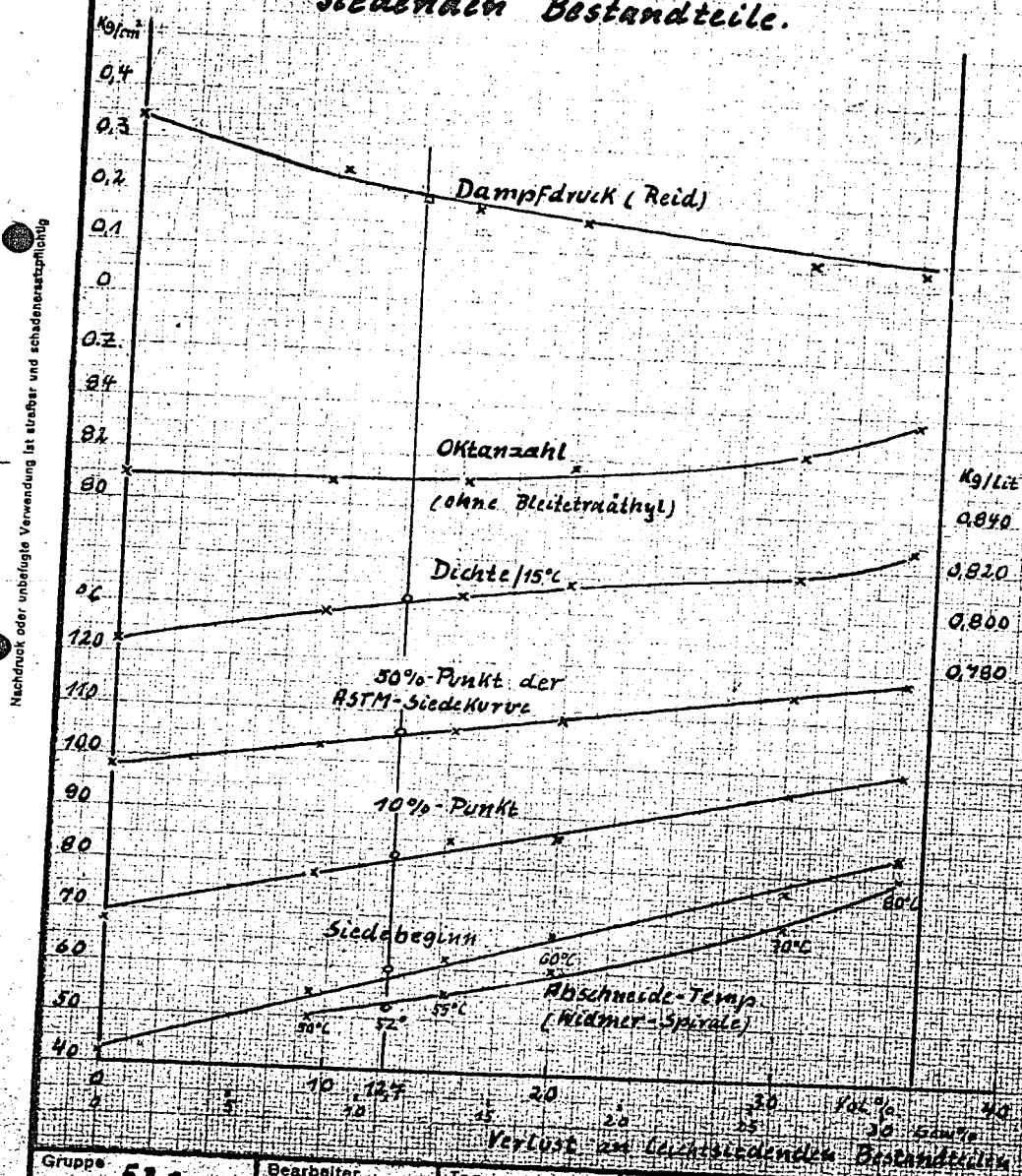
Fabrikform Berlin W 9

001154

Tafel 16.

Blatt 33

Änderung der Analysendaten von
DHD-Benzin bei Abschneiden der leicht-
siedenden Bestandteile.



Gruppe E3C3

Bearbeiter
Soléwisch

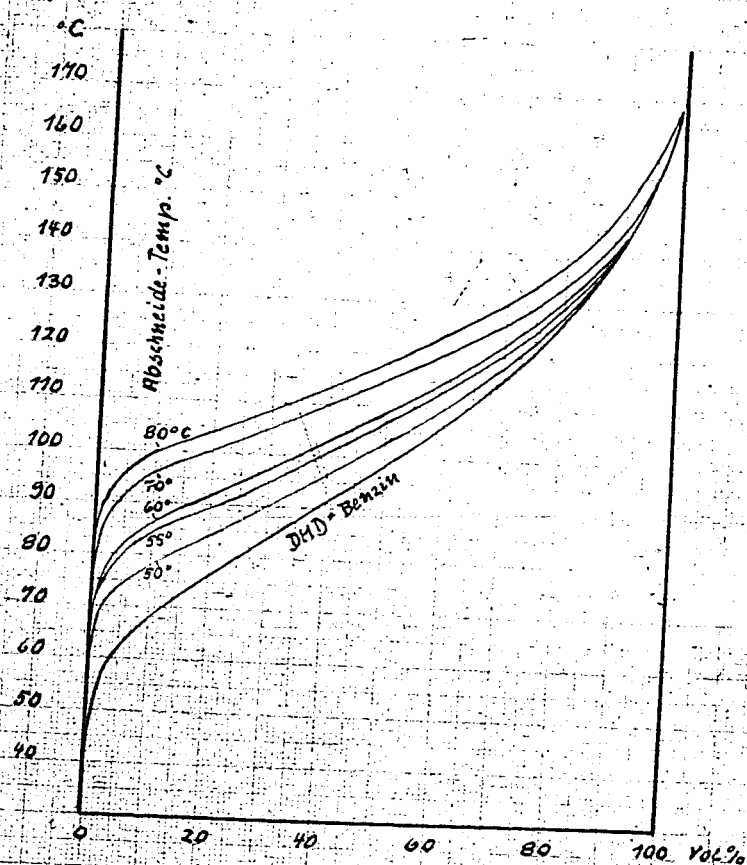
Tag

001155

Tafel 17.

Blatt 34

ASTM-Siedekurven von DHD-Benzin
nach Abschneiden der leichtsiedenden
Bestandteile.



Gruppe

E363

Bearbeiter

Soltwisch

Tag

001156

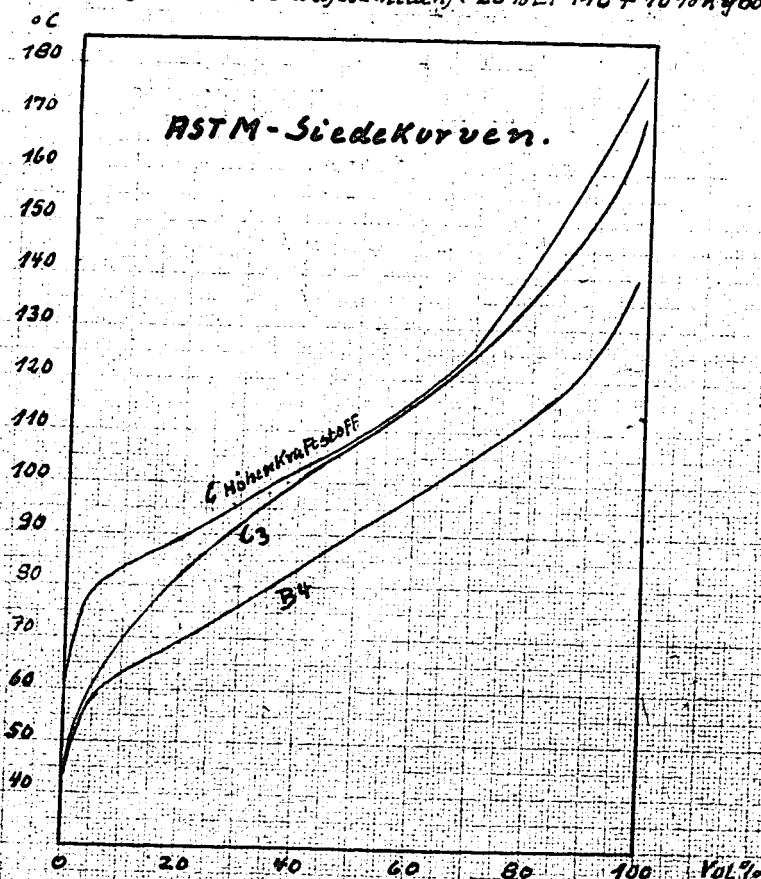
Tafel 18.

Blatt 35

Vergleich zwischen Höhenkraftstoff und dem bisher üblichen Kraftstoffarten.

Kraftstoff	d_{15}^c	n_D^{20}	Reid-Dampfdr. kg/cm ²	BT A Vol %	Unterer Heizwert WE/Kg WE/Lit	
Normales B4	0,728	1,4020	0,48	0,12	~10.400	~7.600
Normales C3	0,772	1,4336	0,33	0,12	~10.205	~7.880
C HöhenKraftstoff	0,788	1,4439	0,20	0,10	~10.120	~7.980

*) 70 Vol % DHD (bei ~52°C abgeschnitten) + 20% ET 110 + 10% Kybol



Gruppe E3C3

Bearbeiter N. M. C.

Tag

001157

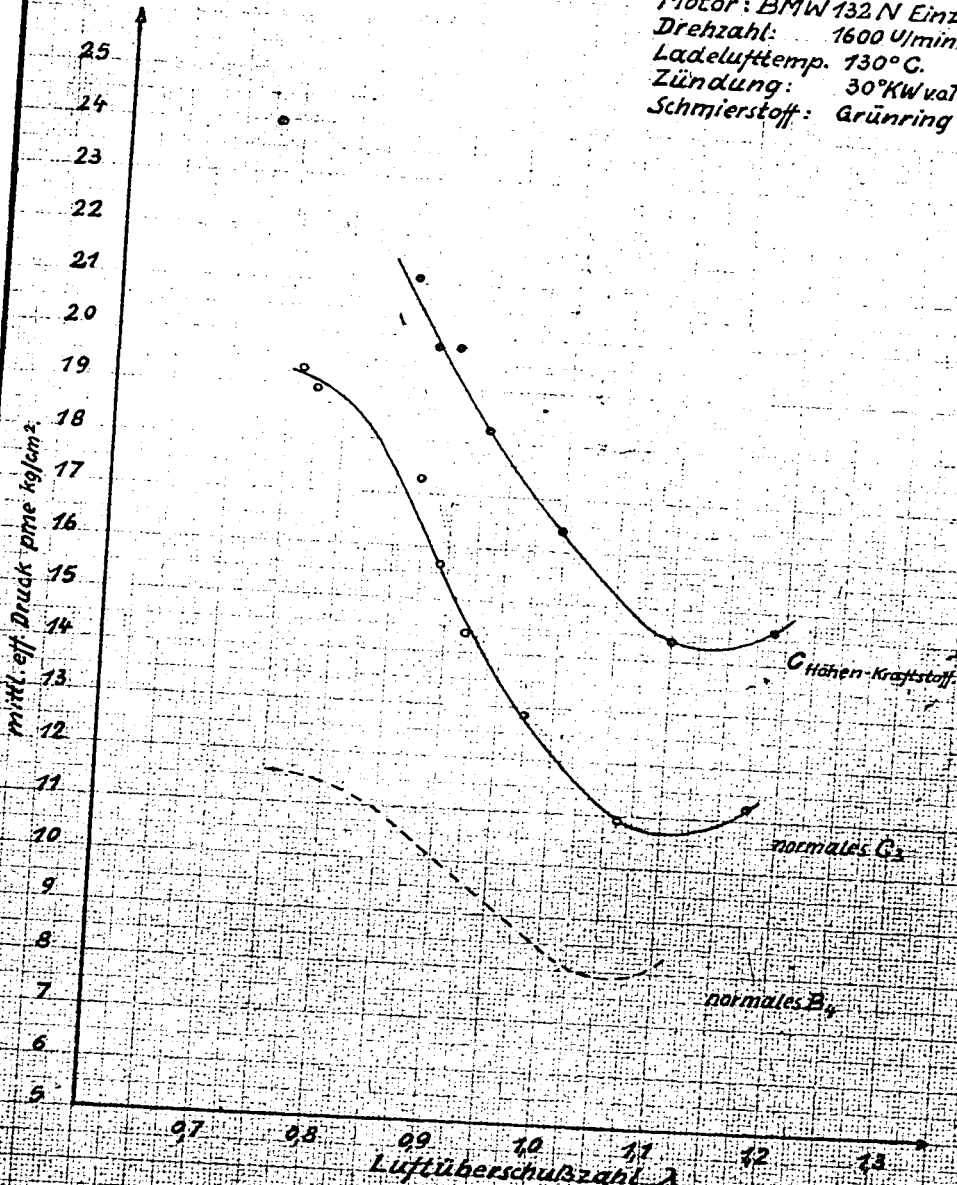
Tafel 19.

Blatt 30

Klopfprüfung nach dem vereinfachten D.V.L. Überladedeprüfverfahren.

Motor: BMW 132 N Einzyl.
Drehzahl: 1600 U/min.
Ladelufttemp. 130°C.
Zündung: 30°KWvaT.-konst.
Schmierstoff: Grünring

Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig



Gruppe E3c1

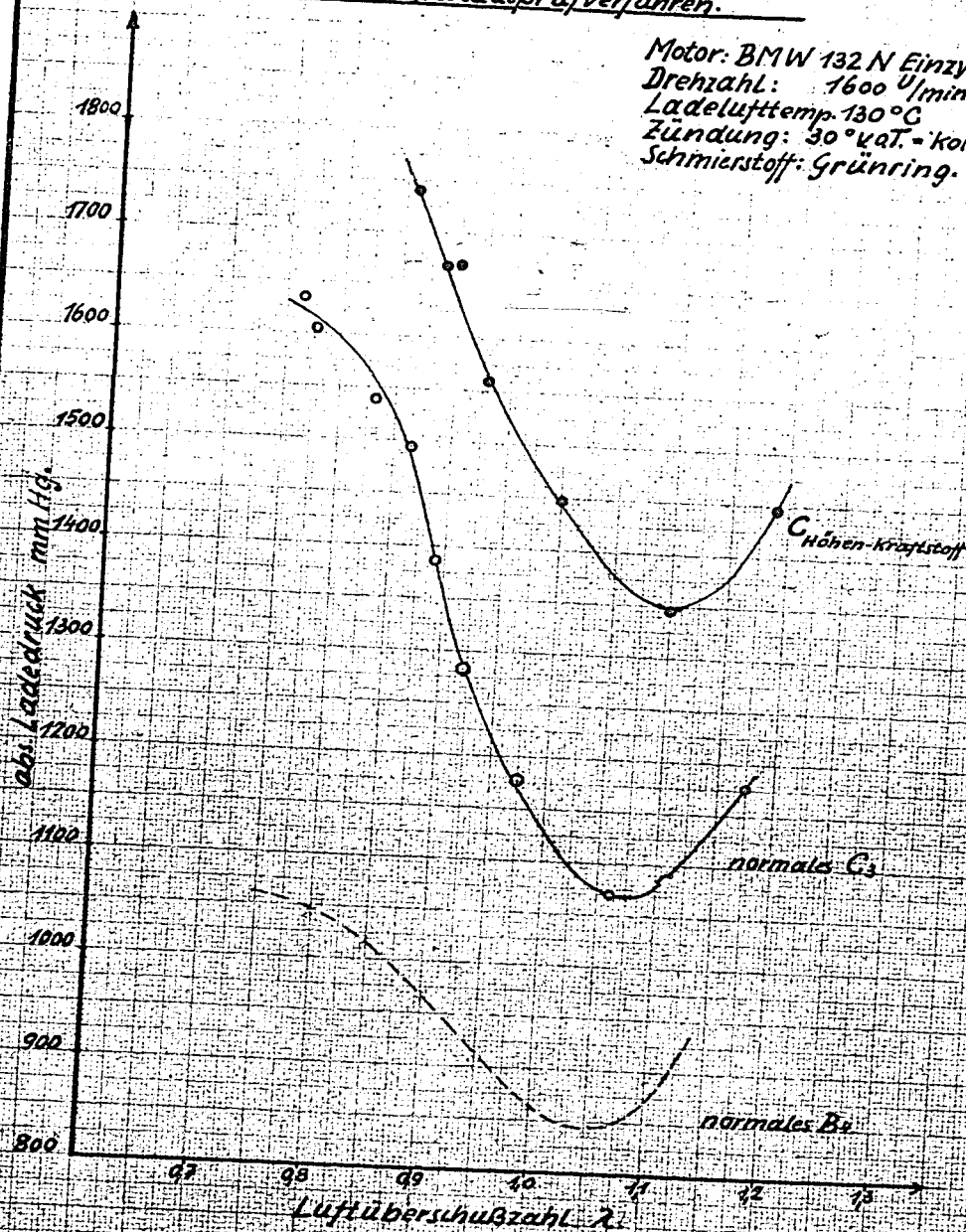
Bearbeiter
MöllerTag
4.2.42.

001158

Tafel 20.
Blatt 37

Klopfprüfung nach dem vereinfachten DVL-Überladeprüfverfahren.

Motor: BMW 132 N Einzyl.
Drehzahl: 1600 U/min.
Ladelufttemp. 130°C
Zündung: 30° v. T. - konst.
Schmierstoff: Grünring.



Nachdruck oder unbefugte Verwendung ist strafbar und schadenersatzpflichtig

Gruppe E3c4

Bearbeiter
MöllerTag
4. 2. 42

2000 2.41 Millimeter-Stahlblech G185e 44

Fabrikname - Berlin-Friedrichshagen

Rechlin E 3 o
Erpr., Nr. 2485

Schlamm-
bildung von Flugmotorenölen

Teilbericht 49

Blatt

001159

Rechlin, den 20. Juli 1942

Zusammenfassung

Die Schlammbildungsneigung der heutigen halbsynthetischen Flugmotoren-Beschaffungsöle ist nicht größer als die der früher verwendeten, aus deutschen und ausländischen Erdölen hergestellten ungefetteten Mineralöle. Ein wesentlich besseres Schlammhaltungsvermögen besitzt das gefettete Mineralöl Aeroshell mittel.

Bearbeiter:

..... *N. Baier*
..... *Hesse*
..... *Riemann*

Gesehen: 25. 7.

W. G. Gumbel
Hptm. und stellv.
E-Leiter

Verteiler:

- 1 x GL/A-M II B
- 1 x GL/A-M II C
- 1 x GL/C-E 3 (Keilpflug)
- 1 x E-Stelle Travemünde E 3 L
- 1 x DVL, Institut für Betriebsstoffforschung
- 1 x Ammoniakwerk Mersaburg (Dr. Zorn)
- 1 x I.G. Farbenindustrie A.G. Ludwigshafen (Dr. Pier)
- 1 x I.G. Farbenindustrie A.G. Ludwigshafen (Prof. Wilke)
- 1 x Intava Hamburg (Dipl. Ing. Borchert)
- 1 x Rhenania-Ossag Hamburg (Dr. Lütkemeyer)
- 1 x Rhenania-Ossag, ZMP, Hamburg-Harburg (Dr. Reichel)
- 1 x Ruhrchemie Oberhausen-Holten (Dr. Schaub)
- 1 x E 3
- 1 x E 3 c
- 1 x E 3 d
- 2 x Reserve

Dieser Bericht enthält 14 Blätter

Bearbeitet:	Geprüft:	Gelesen:	Gelesen:
E3c4: Dr. Baier	E3c: <i>Dr. Gumbel</i>	E3: <i>Hesse</i>	
E3c6: Hesse			
E3d1: Riemann	E3d: <i>Borchert</i>		5/2 27/7
Gruppe	Bearbeiter	Tag	

A. A u f g a b e

001160

Es ist zu untersuchen, ob die seit Anfang 1941 verwendeten halbsynthetischen Beschaffungs-Flugmotorenöle (SS 970 r - Rotring 45) in stärkerem Maße zur Schlamm- bildung neigen als die bis dahin üblichen Mineralöle aus ausländischem und deutschem Erdöl. Die Untersuchungen sind weiter auf künftige Beschaffungsöle und Entwicklungsöle auszudehnen.

B. E r g e b n i s

Die Schlamm- bildung von Flugmotorenölen ist insofern betriebsgefährdend, als sie zum Zusetzen von Filtern und Ölkanälen führen und damit den Öl- strom abdrosseln kann.

Der in einem Verbrennungsmotor entstehende Ölschlamm enthält stets beträchtliche Mengen unveränderten Öles (etwa 40 - 75 %); der Schlamm ist also je nach dem Ölgehalt weicher oder fester. Außerdem sind darin koks- und rußartige Verbrennungsprodukte des Öles und auch des Kraftstoffes, Staub aus der Luft und metallischer Abrieb (zum größten Teil Eisen vom Kolbenring- und Zylinderverschleiß) ebenfalls in größerer Menge und Hart- asphalte, d.h. durch Oxydation und Polymerisation entstandene hochmole- kulare feste Stoffe, in kleiner Menge (etwa 1 %) enthalten.

Die Menge des ausfallenden Schlammes hängt von der thermischen Stabilität des Öles, wahrscheinlich aber in noch höherem Maße von seiner Fähigkeit ab, die entstandenen Zerfallsprodukte in Lösung zu halten. Die Schlamm- bildungsneigung, soweit sie eine Öleigenschaft ist, wird nun weitgehend überdeckt durch äußere Einflüsse, auf die verschiedene Öle ganz verschie- den reagieren können. Schon lange bekannt ist z.B., dass Wasserzusatz bei manchen Ölen den Schlammausfall wenig beeinflussen, bei anderen Ölen da- gegen auf zwei- und dreifache steigern kann. Die hier durchgeführten Ver- suche lassen erkennen, daß noch weitere, bisher noch nicht erkannte Ur- sachen die Schlamm- bildung ganz wesentlich beeinflussen müssen. Daraus geht hervor, dass gelegentliche Urteile aus der Motorenpraxis über die Schlamm- bildungsneigung von Ölen oft sehr zu Unrecht gefällt werden, weil keine vergleichbaren Betriebszustände vorlagen.

001161

Die später beschriebenen Versuche konnten, obwohl sie mit der bei Vollmotorenversuchen überhaupt möglichen Gleichmäßigkeit und Genauigkeit durchgeführt wurden, auch noch keine restlose Klarheit verschaffen und sind nur als ein erster Versuch zur Lösung der versuchstechnisch außerordentlich schwer zu erfassenden Schlammfrage zu betrachten. Mit einiger Sicherheit haben die Versuche den aus der Praxis bekannten geringen Schlammfall des gefetteten Aeroshell mittele bestätigt. Dieses Öl scheint also auf äußere Einflüsse hinsichtlich Schlamm- bildung wenig zu reagieren. Leider begünstigt es bekanntlich das Festbrennen der Kolbenringe in so starkem Maße, daß für eine Reihe von Flugmotoren nicht zugelassen werden kann, also die erstrebte Tendenz zum Einheitsöl empfindlich stört.

Auch das Entwicklungsöl P 20 der I.G. Farbenindustrie, Ludwigshafen scheint eine relativ gute Schlammhaltigkeit zu besitzen, was jedoch noch durch weitere Versuche zu bestätigen ist. Dasselbe gilt für das Öl SS 2010 der Ruhrchemie.

Alle anderen untersuchten Schmierstoffe, also sowohl Mineralöle natürlicher Herkunft, aus deutschem und ausländischem Erdöl hergestellt, als auch die heutigen halbsynthetischen Öle ergeben maximale Schlamm- mengen von derselben Größenordnung (vergl. Tafel 3). Außerdem wurden aber auch Werte gefunden, die fast bis zu denen des Aeroshell mittelmäßig herabsinken, wobei, wie eingangs erwähnt wurde, die Ursachen des so stark verschiedenen Schlammfalls noch unklar sind. (Ein Wassereinfluß war bei diesen Versuchen nicht nachweisbar). Je größer die auftretende Schlamm- menge ist, desto ölhaltiger, also desto weicher wird der Schlamm, eine Beziehung, die sich für alle untersuchten Öle annähernd in einer Kurve darstellen läßt (vergl. Tafel 5).

Weitere Versuche.

Zwecks Herabsetzung der Versuchskosten werden weiter systematische Versuche, um die Ursachen der Schlamm- bildung festzustellen, in Einzylinder- Motoren durchgeführt werden. Dabei soll auch untersucht werden, ob durch Filterung oder Zentrifugalwirkung ausgeschiedene Schlämme sich grund- sätzlich unterscheiden. Ferner sind noch mikroskopische Untersuchungen von Schläm- men beabsichtigt.

Gruppe

Bearbeiter

Tag

0000 B. 41

Fabriknorm Berlin-Friedenau