

Deutsche Kraftfahrtforschung
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

Heft 63

(100)

J. W. Kamm
Kamm

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 Technischen Hochschule Stuttgart (Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. W. Kamm VDI)

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

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 Dieselmotorkraftstoffe	14
43	Prüfung der Ottokraftstoffe	17
5	Zusammenfassung	18
6	Schrifttumsverzeichnis	19

Zündverzugsmessungen an Diesel- und Ottokraftstoffen

Von Dr.-Ing. O. Widmaier

1	Aufgabenstellung	21
2	Das FKFS-Zündverzugs-Prüfverfahren für Kraftstoffe	21
3	Voruntersuchungen über den Einfluß der Verdichtung auf die Cetanzahl von Abadammischungen	23
4	Ergebnisse mit Dieselmotorkraftstoffen 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 Zusammensetzung	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	Schrifttumsverzeichnis	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 Verbrennungsfrent 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 Schrifttumsverzeichnis 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 deaktivierenden 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 gasförmigem 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 Umsetzungsvorganges,
- 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 $^{\circ}K$).

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:

$$\text{Einfluß: } \underbrace{Q_1^n \cdot \frac{Q_2 n'}{Q_1}}_{\text{Gesamtdruck}} \underbrace{(1 + a)}_{\text{Kraftstoffkonzentration}} \underbrace{\frac{Q_1}{Q_1} d^2 \cdot e^{-E/RT} \cdot z}_{\text{Anteil inerte Gase}} = \text{konst} \quad (7).$$

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 Beschleunigens 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 einzelnen 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

21 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 aufgebrachten, 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- 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 leichten Querschnitte des Kegels ist es möglich, nahezu punktförmige Messungen durchzuführen; Schwierigkeiten bereitet mitunter die Schwächung der Empfindlichkeit durch Ver- rauen des Aufnahme Fensters. Durch geeignete Ausbildung und Anordnung des Fensters sowie durch Anpassung an die Betriebsverhältnisse kann das Verrauen 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.

22 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-Einzylindermotor 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 GSpIE) 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 Höchstempfindlichkeit 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 Aufnahmeöffnungen hatten Quarzeinsätze mit einem lichten Querschnitt, der so groß wie baulich möglich gehalten wurde (6; 10 und 7 mm Dmr.).

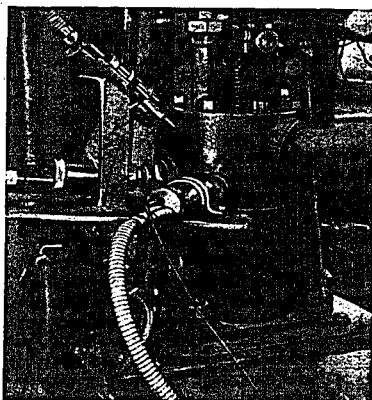
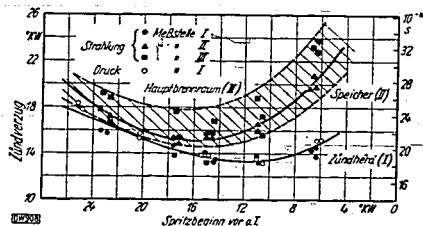


Bild 1. Anordnung der Photozellen zur gleichzeitigen Aufnahme der Ausstrahlung in der Speichermündung (*I*), im Speicher (*II*) und im Brennraum (*III*).



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

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



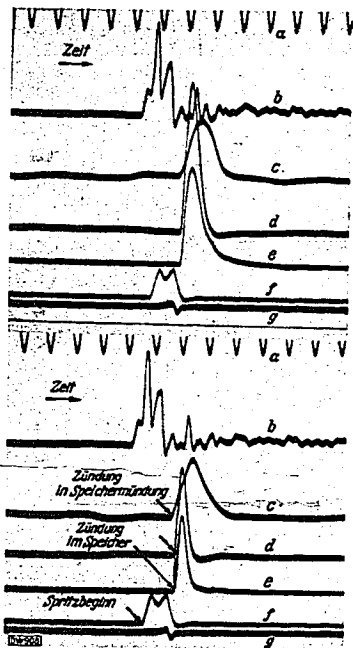
Im allgemeinen tritt der kleinste Zündverzögerung und daher die erste Entzündung des Kraftstoffs im Hauptbrennraum in der Gegend der Speichermündung auf (Bild 3); der Kraftstoff trifft hier auf seinem Wege von der dem Speicher gegenüberliegenden Einspritzdüse durch den Brennraum hindurch auf die heiße 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 Zündverzögerung 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 Einspritzpunkte 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) Zündverzögerung 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 verbrannt. 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.



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.

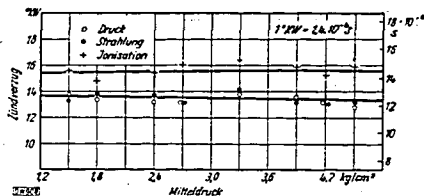


Bild 5. Zündverzögerung, mit verschiedenen Meßverfahren (Druck, Strahlung, Ionisation) ermittelt, in Abhängigkeit von der Belastung (Mitteldruck).

Meßstelle: Speichermündung.
Lanova-Dieselmotor, 1200 U/min.

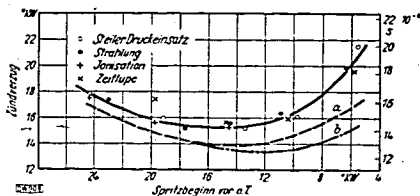


Bild 6. Verbrennungseinsatz (Zündverzögerung) im Speicher bei verschiedenem Spritzbeginn.

Lanova-Dieselmotor, $p_a = 3 \text{ kg/cm}^2$.
Erste schwache Druckanzeige im Speicher (Kurve a), im Brennraum (Kurve b).

Bild 4 (links). Strahlungsverlauf im Lanova-Luftspeichermotor; zwei Aufnahmen bei gleichen motorischen Betriebsverhältnissen.

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 Aufflammen 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 Einsatzzunkte von Druck oder Strahlung beim Zündbeginn im Vergleich zum weiteren Verlauf regelmäßiger liegen — die Ionisationsstrecke ergibt durch die punkt förmige Messung größere Streuungen —, so ermittelt man trotzdem Gesetzmäßigkeiten für den Zündverzögung 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 Zündverzögung, 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 Zündverzögung 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 Aufnahme fensters. 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.-Forschg. 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 Drehpulsergerät 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

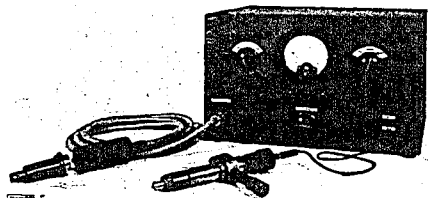
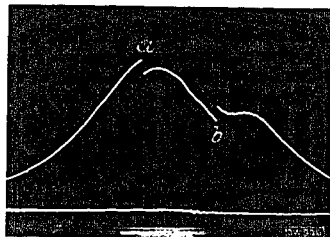


Bild 7. FKFS-Zündverzugsmeßgerät.



Späteinspritzung

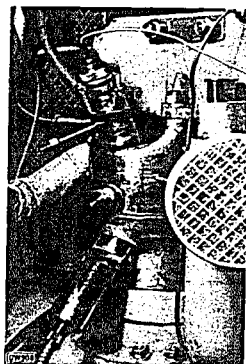
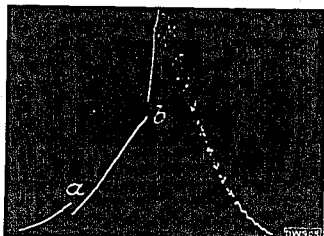


Bild 8. Photozelle (a) und Kontakt (b) am FKFS-Prüfmotor angebaut.



Früheinspritzung

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 Ablesegenauigkeit des Anzeigeapparates beträgt $\frac{1}{10}^\circ$ 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 Anzeigeapparates.

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.

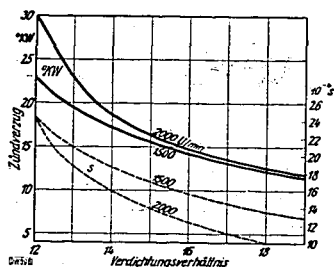


Bild 10 a.
Einfluß des Verdichtungsverhältnisses.
Voreinspritzwinkel = 20° .

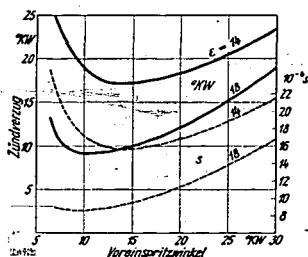


Bild 10 b.
Einfluß des Voreinspritzwinkels.
 $n = 1800$ U/min.

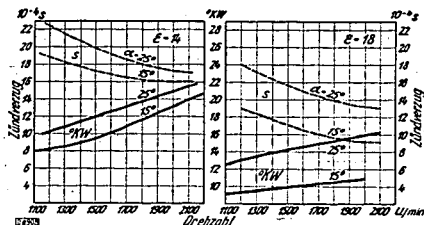


Bild 10 c. Einfluß der Drehzahl.

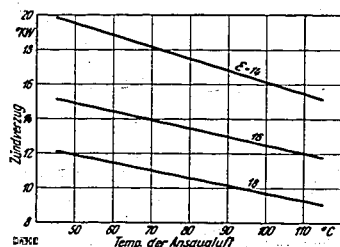


Bild 10 d. Einfluß der Ansauglufttemperatur.
 $n = 1800$ U/min.

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 Verdichtungsendtemperatur, 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.

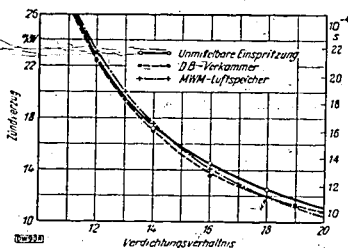


Bild 11. Zündverzug mit verschiedenen Verbrennungsverfahren in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis.

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

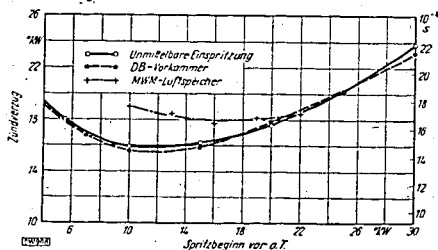


Bild 12. Zündverzug mit verschiedenen Verbrennungsverfahren in Abhängigkeit vom Spritzbeginn.

Für einen einwandfreien Vergleich ist es notwendig, daß alle Bedingungen, die nicht für die Eigenart des betreffenden Verbrennungsverfahrens kennzeichnend sind, gleichgehalten werden. Der FKFS-Dieselmotor⁴⁾ 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 Verdichtungs- und 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

⁴⁾ 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 Zündverzög (bis zu 2° KW) festgestellt. Die kleineren Zündverzöge 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 Zündverzögs 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 Zündverzöge. 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 unterteilten Brennräumen 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 Zündverzög. Von einem Sauerstoffgehalt von mehr als 50 % ist nur noch eine geringe Abnahme des Zündverzögs zu erwarten, während unterhalb 10 % Sauerstoffgehalt der Zündverzög stark ansteigt. Die Wirksamkeit der einzelnen

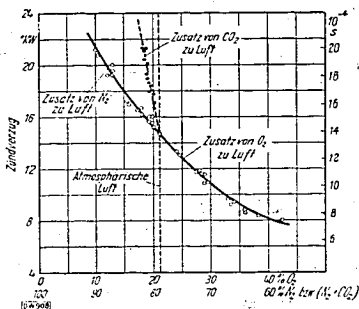


Bild 13. Zündverzög in Abhängigkeit vom Sauerstoff-Stickstoff-Verhältnis.
PKFS-Prüfmotor, unmittelbare Einspritzung, $\epsilon = 15$,
 $n = 1800$ U/min.

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

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

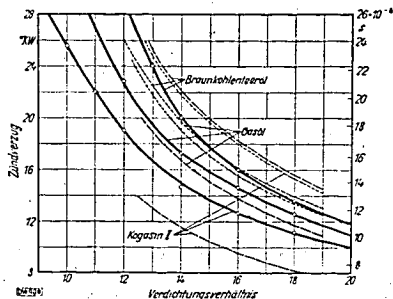
Bei der Kraftstoffbewertung muß also auch auf die den Abgasanteil verändernden Einflüsse geachtet werden.

35 Einfluß des Kraftstoffs

Die bis jetzt aufgeführten Einflüsse wirken sich auf den Zündverzög 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-Dieselpförmotor bei unmittelbarer Einspritzung untersucht worden und in Bild 14 dargestellt. Die Gesetzmäßigkeit des Zündverzugsverlaufs ist für alle drei Kraftstoffe nahezu gleich. Die Unterschiede im Zündverzögerung werden mit höherer Verdichtung immer kleiner, die Kurven streben also einem gleichen Kleinstwert zu. Auch bei Änderung des Spritz-



○ gemessene Werte
 --- errechnete Werte ohne Berücksichtigung der Zündwilligkeit
 --- .. mit

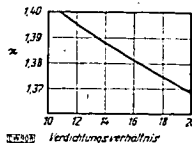


Bild 15. Verdichtungs-exponent x bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen.

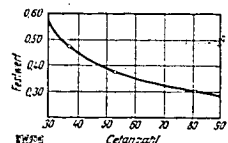


Bild 16. Veränderung des Festwertes von Gl. 6a mit der Zündwilligkeit (Cetanzahl) nach den Meßergebnissen von Bild 14.

Bild 14 (links). Zündverzögerung 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 Zündverzögerung für gleichen Cetanzahlunterschied kleiner, sind aber noch deutlich vorhanden.

Eine Berechnung dieser Zündverzögerungen nach Neumann und Egerov (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 Verdichtungsdrücken 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 $C_n = 37$) 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 Wolfer (Gl. 6 a) der errechnete Zündverzögerung ohne Berücksichtigung der Zündwilligkeit

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

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 Zündverzug 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 Verkoksungsneigung 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 Dieseldkraftstoffe

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 Verfahrensorten⁵⁾.

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 $\epsilon = 10$ und 25, deshalb sind auch Druck und Temperatur der Verbrennungsluft entsprechend verschieden, voraus 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 Ansaugluft 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-Dieselprüfmotor 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

⁵⁾ 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 Spritzanzeig wurde am FKFS-Prüfmotor eine mit dem Schwungrad umlaufende, durch den Einspritzkontakt gesteuerte Glimmlampe angebaut.

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.

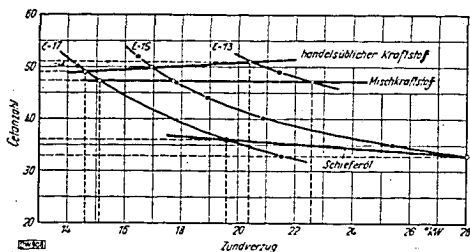


Bild 17. Bewertung des Kraftstoffs bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ϵ .

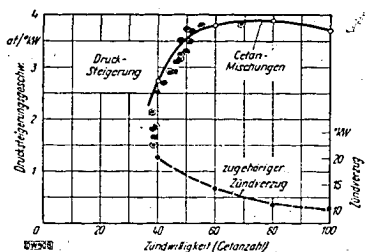


Bild 18. Drucksteigerungsgeschwindigkeit von Cetanzahlmischungen (obere Kurve) und einer Anzahl Kraftstoffen (beringte Punkte) bei verschiedener Zündwilligkeit (Cetanzahl C_n).
Spritzbeginn 20° KW vor o. T., $\epsilon = 14$,
 $n = 1800$ U/min.

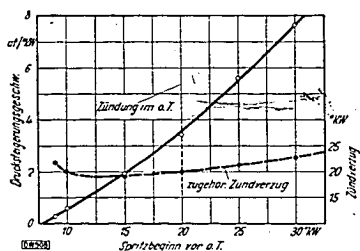
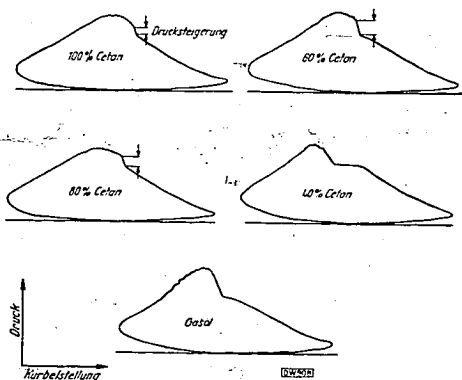


Bild 19. Drucksteigerungsgeschwindigkeit bei Änderung des Spritzbeginns.

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 Cetanzahlmischung 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 Zündverzögerungsmessung mit Hilfe der Gleichungen für den Zündverzögerung (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 Klopffestigkeit 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 Klopffestigkeit des Kraftstoffs kann daher auch als Widerstand gegen die Selbstzündung oder als Zündträgerheit und damit als begriffsgleich mit der Zündwilligkeit aufgefaßt werden. Der versuchsmäßig festgestellte Zusammenhang zwischen Klopffestigkeit 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 Zündverzögerung 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 Zündverzögerung ermittelte Klopfintensität 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 Zündverzögerungsverfahren unmittelbar bestimmt wird; d. h. statt des Umwegs über die Cetanzahl werden als Vergleichswerte die Zündverzögerungen der entsprechenden Oktanmischungen bzw. deren Ersatzmischungen festgestellt.

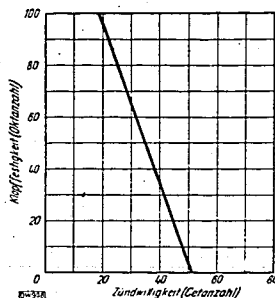


Bild 21. Zusammenhang zwischen Klopfintensität und Zündverzögerung der üblichen Bezugsmischungen. FKFS-Prüfmotor.

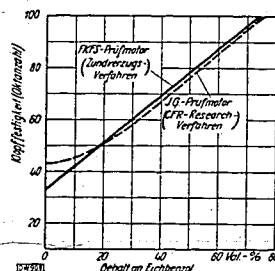


Bild 22. Klopfintensität von Mischungen aus Eichbenzol und -benzin nach dem Zündverzögerungs- und dem Springstabverfahren.

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 Zündverzögerung erstrecken sich auf die physikalischen sowie die chemischen Vorgänge. Eine rechnerische Erfassung ist bis jetzt nur hinsichtlich der reaktionskinetischen Vorgänge möglich.

Zur genauen Bestimmung des Zündverzögerung, 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 der Kraftstoffe 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 Schrifttumsverzeichnis

- [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. Peletier: 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 Dieselkraftstoffen — 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] Herele, L.: Zündverzug und Ausbeutung der Verbrennung im Dieselmotor mit Strahleinspritzung — 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] *Prettre, 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 Dieselkraftstoffen — *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] *Semenoff, 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.

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 Dieselmotorkraftstoffe. Aber auch nach Erfüllung dieses Wunsches im Sinne eines der heute angewendeten Verfahren brauchte man für Otto- und Dieselmotorkraftstoffe 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 Kraftstoffeigenschaften 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 Kraftstoffs im Gemisch angegeben (Oktanzahl). Entsprechend wird der Zündverzug der Dieselmotorkraftstoffe 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, 10]¹⁾. 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 Dieselmotorkraftstoffe, 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 Dieselmotorkraftstoffe 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 Schrifttumsverzeichnis 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	$n = 2500 \text{ U/min};$
Bohrung	100 mm;
Hub	130 mm;
Hubraum	1040 cm^3

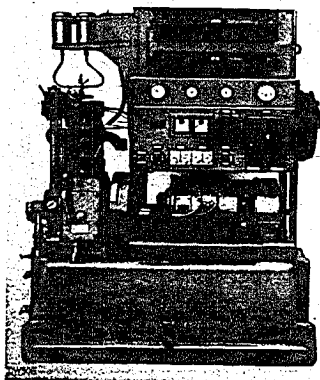


Bild 1. FKFS-Kraftstoffprüfstand.

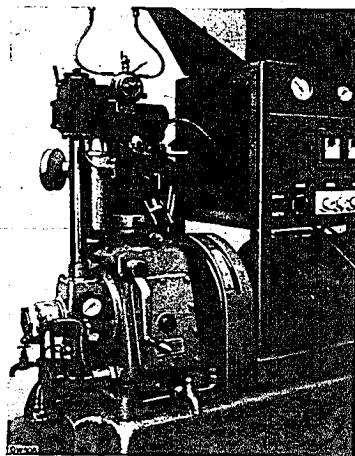


Bild 2. Teilansicht des Prüfstandes mit dem FKFS-Kraftstoffprüfmotor.

Bei der Kraftstoffprüfung wird folgender Betriebszustand eingehalten:

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

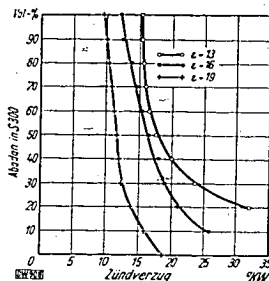
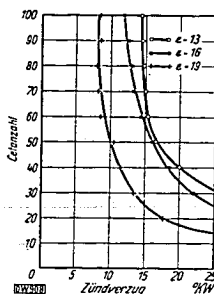


Bild 3 und 4. Zündverzugskurven von Gemischen aus Cetan und Alphamethylnaphthalin (Bild 3) sowie aus Abadan und S 300 (Bild 4) bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ϵ .

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 Abadangemische 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 Abadangemische 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.

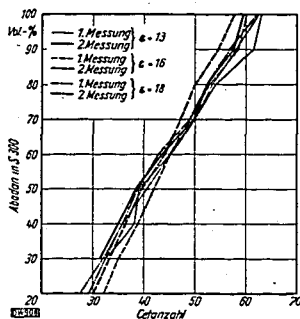


Bild 5. Cetanzahlen von Gemischen aus Abadan und S 300 bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ϵ .

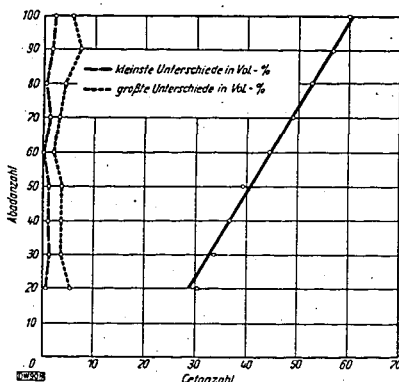


Bild 6. Zusammenhang zwischen Cetanzahl und Abadanzahl.

Die gestrichelten Kurven beziehen sich auf Bild 5.

4 Ergebnisse mit Dieselkraftstoffen verschiedener Zusammensetzung

Die neuen Erkenntnisse für die Prüfung von Dieselkraftstoffen 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 verrußte 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

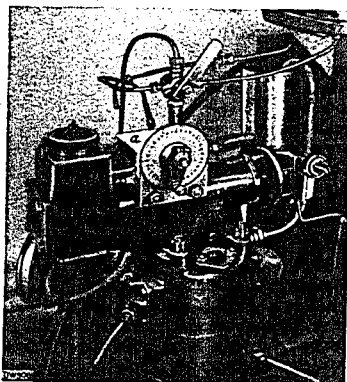
Da die schlecht zündenden Kraftstoffe hohen Dampfdruck und demzufolge niedrige Verdampfungstemperatur aufweisen, ließ sich die Kraftstoffeinspritzung mit der üblichen Bosch-Einspritz-Anordnung ohne besondere Maßnahme nicht bewerkstelligen. An sich müßte zwar bei dem hohen Einspritzdruck von 180 atü der 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 Kohlendioxid gefüllt war, so daß die Einspritzpumpe vollkommen vom Kühlmittel umgeben war (Bild 7). Außerdem war die Einspritzleitung von einer Kühlschlange umgeben, die in Asbestbrei gebettet war. Das Kühlmittel in der Kühlschlange 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 Kohlensäureschneekühlung wirkte. Trotzdem arbeitete bei den meisten Kraftstoffen die Einspritzpumpe einwandfrei. Auf Grund dieser Erkenntnis wurden die weiteren Versuche mit Ottokraftstoffen nur noch mit der Kohlensäureschneekühlung an der Pumpe durchgeführt.

Bild 7. Kühlanlage an der Einspritzpumpe.
a Behälter mit Kohlensäureschnee, 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 Verrußung 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 Verrußung, 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 Zweiteilung 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 Oktananzahl und Cetanzahl

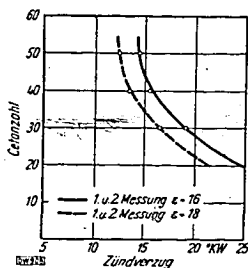


Bild 8 (links). Cetan-Eichkurven zu den Messungen des Bildes 9 für zwei Verdichtungsverhältnisse ϵ .

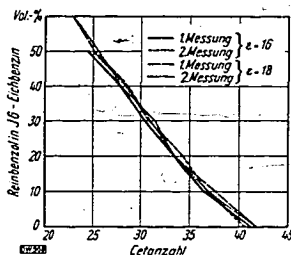
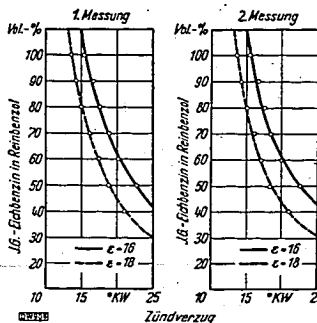


Bild 10. Gemessene Werte.

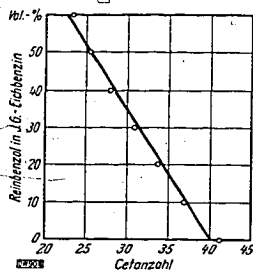


Bild 11. Mittelwert-Linie.

Bild 10 und 11. Zusammenhang zwischen den Anteilen an Reibenzol in Reibenzol-Eichbenzin-Gemischen und der Cetanzahl.

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

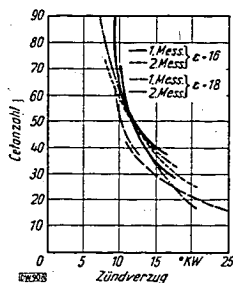


Bild 12 (links). Cetan-Eichkurven zu den Messungen des Bildes 13 für zwei Verdichtungsverhältnisse ϵ . Die Unterbrechungen bei einem Teil der Kurven sind durch Ausbau und Reinigen des Quarzfensters bedingt.

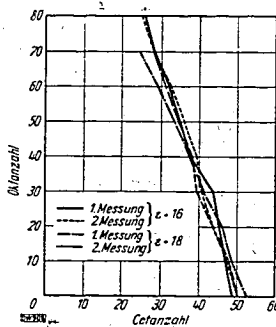
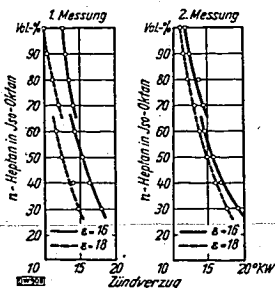


Bild 14. Gemessene Werte.

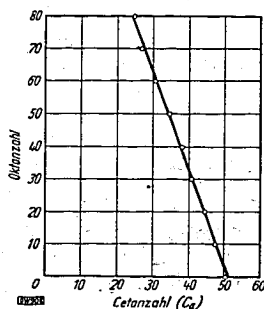


Bild 15. Mittelwert-Linie.

Bild 14 und 15. Zusammenhang zwischen Oktan- und Cetanzahl.

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

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.

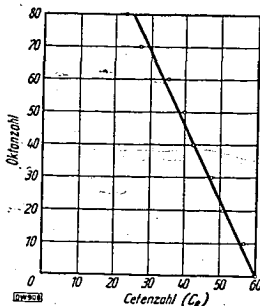


Bild 16. Zusammenhang zwischen Oktan- und Cetanzahl.

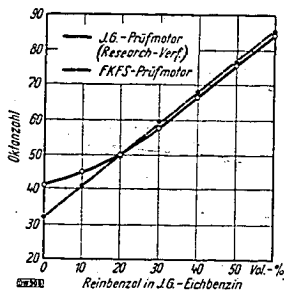


Bild 17. Zusammenhang zwischen Oktanzahl und den Anteilen an Reibenzol in Reibenzol-Eichbenzin-Gemischen nach Messungen am I. G.-Prüfmotor und am FKFS-Prüfmotor.

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 Zündverzugsmessungen 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 Bleiteträthyl 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.-% Bleiteträthyl) zugegeben und von den so verbleiten Kraftstoffen die Cetanzahl bestimmt. Der Bleiteträthylzusatz 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 verrußte bei der Messung von I. G.-Eichbenzin mit Alkoholzusätzen fast gar nicht, und zwar am wenigsten mit Amylalkoholzusatz.

Während Bleiteträthyl und die Alkohole als Zusatzstoffe bekannt sind, die die Klopfestigkeit eines Kraftstoffes erhöhen, also die Zündwilligkeit herabsetzen, wird Äthylnitrat 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	Zündverzugs °KW	Cetanzahl
Cetan-Eichgemisch 50	9,6 bis 9,7	50
Heptan	—	50
Oktan	14,8 bis 15,0	33
Nonan	12,4 bis 12,6	38
Cetan-Eichgemisch 40	11,8 bis 12,0	40
Hexan	16,6 bis 16,8	24,5
Cetan-Eichgemisch 30	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

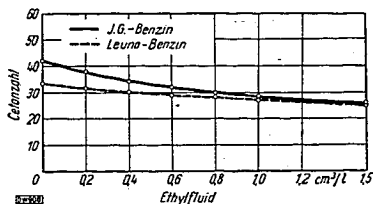


Bild 18. Einfluß von Ethylfluid (mit rd. 65 Gew.-% Bleitetraäthyl) auf die Cetanzahl von I.G.-Benzin und von Leuna-Benzin.

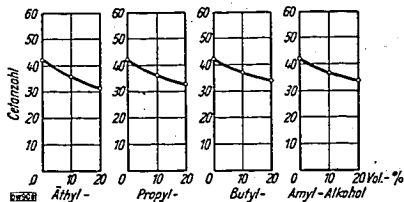


Bild 19. Einfluß von Alkoholzusätzen auf die Cetanzahl von I.G.-Benzin.

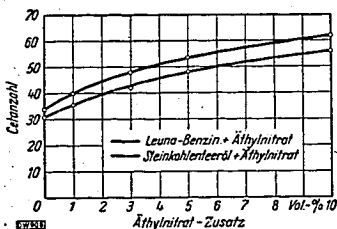


Bild 20. Einfluß von Äthylnitrat auf die Cetanzahl von Leuna-Benzin und Steinkohlenteeröl.

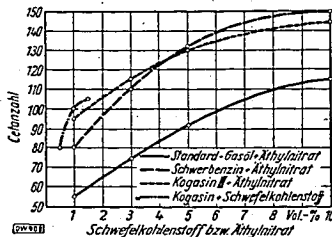


Bild 21. Einfluß von Äthylnitrat sowie von Schwefelkohlenstoff auf die Cetanzahl von Kraftstoffen.

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 Cetanzahl nähern sich asymptotisch einem Bestwert.

An Kogasin wurde außerdem noch der Einfluß von Schwefelkohlenstoff geprüft. Die Zündverzugsmessung 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	76,4	— 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 verdampfbaren 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 Zündverzugsmessung 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 Zündverzugsmessungen 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 Röhrchen 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.

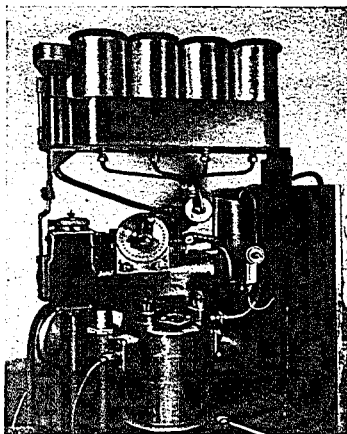


Bild 22. Kraftstoffbehälter-Anordnung mit Verteiler und Meßglas am FKFS-Prüfmotor.

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 Dieselmotorkraftstoffe 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 Zündverzugsseichkurven 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 Unterbezugs-kraftstoffen. Die Diesellokraftstoffe 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	Verdichtungs-verhältnis ϵ	Cetanzahl	Oktanzahl aus Kurvenblatt (Bild 15)	Oktanzahl unmittelbar bestimmt
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	
Diesellokraftstoff Nr. 1 .	15,8	62,0	< 0	
	13,0	63,0	< 0	
	11,8	62,5	< 0	
Diesellokraftstoff 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 zwischenwährend 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 eingengt, daß nur noch geringe Unterschiede im Zündverzug zwischen dem zu untersuchenden Kraftstoff und den Eichmischungen bestehen. Nach zwei Vergleichsmischungen, deren Zündverzüge 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 Isooktan 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

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] Witke, W.: Untersuchungen am Hesselman-Motor — Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 778/80 (Bild 12).
- [8] Witke, W.: Prüfmotoren zur Klopfwertbestimmung von Kraftstoffen — Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 1135/42.
- [9] Witke, W.: Motorische Prüfung von Kraftstoffen — In: Beihefte zu den Zeitschriften des VDCh Nr. 33 (Die Untersuchung von Treibstoffen für Vergasermotoren), Berlin: Verlag Chemie 1939, S. 1/7.
- [10] Witke, 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. Heidebroek 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