

Technischer Prüfstand

Geheim

M 11-11

Deutsche Luftfahrtforschung

Forschungsbericht Nr. 1545

Untersuchungen über die Vorreaktionen im Ottomotor

Mühlner

Verfaßt bei

Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring

Institut für Motorenforschung

Zentrale für wissenschaftliches Berichtswesen
der Luftfahrtforschung des Generalluftzeugmeisters (ZWB)
Berlin-Adlershof

Dieser Bericht ist geheim zu behandeln.
Wer diese Geheimhaltungspflicht verletzt,
setzt sich der Gefahr strafrechtlicher Ver-
folgung und schwerer Bestrafung aus.

Panzerverschluß erforderlich!

Untersuchungen über die Vorreaktionen im Ottomotor

Übersicht: In dem von einem Ottomotor verdichteten Kraftstoffdampf-Luftgemisch lassen sich schon vor der Entzündung durch die von der Zündkerze ausgehende Flammenfront chemische Reaktionen nachweisen, die sog. Vorreaktionen. Die Kenntnis ihres Ablaufs ist für das Verständnis und damit für eine Vermeidung des Klopfens von grosser Bedeutung. Die Untersuchung dieser Reaktionen kann am mit eigener Kraft laufenden Motor geschehen oder an Verbrennungsbomben. Während ersteres Verfahren versuchs-technisch sehr schwierig ist, hat das letztere den Nachteil, dass jeweils nur ein einzelner Vorgang untersucht werden kann. Es wird deswegen zu neuen Versuchen der fremd angetriebene, gemischverdichtende Motor ohne Zündung gewählt, in dem die auftretenden Vorreaktionen durch ihre Wärmewirkung der Messung zugänglich sind.

Der Bericht umfasst:

72 Seiten mit
24 Abbildungen und
3 Zahlentafeln

INSTITUT FÜR MOTORENFORSCHUNG
DER
LUFTFAHRTFORSCHUNGSANSTALT HERMANN GÖRING

Der Institutsleiter

E. J. J. J.

Der Sachbearbeiter

J. W. W.

Braunschweig, den 10. I. 1942.

6342

Gliederung:

	Seite
I. Bedeutung der Vorreaktionen für das Klopfen	3
II. Die Versuche von Peletier und seinen Mitarbeitern	5
III. Neue Versuche über Vorreaktionen im Motor	8
a) Gesichtspunkte für das Versuchsprogramm	8
b) Die Versuchsanordnung	9
1) Saugleitung u. Gemischbildung	11
2) Auspuffleitung	12
3) Anlagen für Kraftstoff, Schmieröl, Kühlmittel	13
4) Antriebsanlage	14
5) Angaben über die Betriebsbedingungen und Bezeichnungen	15
c) Durchführung der Versuche	17
d) Die Genauigkeit der Messwerte	24
e) Ergebnisse	25
1) Die Verdichtungshöchsttemperatur	25
2) Typisches Verhalten von Fliegerkraftstoffen	26
3) Besprechung der allgemeinen Kurvenform	30
4) Versuche mit verschiedenen Kraftstoffen. Einfluss von Bleitetraäthyl	33
5) Abhängigkeit der Vorreaktionen von den Motorbetriebsbedingungen	38
6) Indikatorgramme	41
7) Messung des Drehmomentes	44
8) Chemische Analyse, Leuchterscheinungen	45
IV. Folgerungen aus den Motorversuchen	46
V. Zusammenfassung	47
VI. Schriftumsverzeichnis	48

I. Bedeutung der Vorreaktionen für das Klopfen.

=====

Nach Erkenntnissen, die man als gesichert ansehen darf, gilt für das Klopfen im Ottomotor folgende Erklärung:¹⁾

Nach Einleitung der Verbrennung durch den Zündfunken läuft von der Zündkerze aus eine Flammenfront durch den Verbrennungsraum, die nacheinander alle Teile des Gemisches entzündet. Bei normaler, nichtklopfender Verbrennung treten dabei keine merklichen Druckunterschiede auf, und die Verbrennung der letzten Teile geschieht nicht wesentlich anders als der ersten.

In jedem Falle werden durch die Ausdehnung des Verbrannten die noch nicht verbrannten Gemischteile verdichtet. Im Falle klopfender Verbrennung nun werden diese Teile durch die Verdichtung zur plötzlichen Selbstzündung gebracht, bevor die Flammenfront über sie hinwegläuft. Diese Selbstzündung erfasst so plötzlich den ganzen unverbrannten Gemischrest, dass der Druck sich nicht ausgleichen kann. Es entsteht also eine Störung der Druckverteilung, die sich über Stosswellen und Gasschwingungen ausgleicht. Diese Stosswellen verursachen das Klopfgeräusch und infolge des erhöhten Wärmeüberganges den am klopfenden Motor beobachteten Leistungsverlust. (2)²⁾

Ob ein Motor klopft oder nicht, hängt also lediglich davon ab, ob der noch nicht von der Flammenfront erreichte Gemischteil zur Selbstzündung gebracht wird. Dies ist nicht nur eine Frage der Motorbetriebsbedingungen, die über den Wärmeaustausch Einfluss auf den Gaszustand im Zylinder haben, sondern hängt vor allem auch von den Eigenschaften des

1) Vgl. z. B. "Phys. und chem. Vorgänge b. d. Verbrenng. i. Motor", Vorträge und Aussprachebeiträge erstattet auf der 5. Öff. Sitzg. der deutsch. Akad. d. Lu. Fa. Forschg. 10/11. Mai 1939, Schriften d. dtsh. Akad. d. Lu. Fa. Forschg. Heft 9

2) Die Zahlen in () beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluss der Arbeit.

Kraftstoffes ab. Die Selbstzündung ist aber, wie das Auftreten eines Zündverzuges oder - wie der Chemiker sagt - einer endlichen Induktionszeit beweist, kein einfacher Vorgang. Sie wird vielmehr vorbereitet durch Vorreaktionen, bei denen die komplizierten Kohlenwasserstoffmoleküle teilweise in Radikale zerfallen, die leichter zu oxydieren sind, als die unveränderten Moleküle. Diese Oxydation vollzieht sich auf dem Wege von Kettenreaktionen. (3) Durch Verzweigung der Ketten, d.h. dadurch, dass bei einer Teilreaktion, also einem Gliede der Reaktionskette, sich die Zahl der aktiven Teilchen erhöht, kann die Reaktion stark beschleunigt werden. Durch Bindung der Radikale kann die Kette abgebrochen werden. Das geschieht durch die klopfhindernden Mittel wie Bleitetraäthyl usw. In den klopffesten Brennstoffen vollziehen sich die Vorreaktionen nicht in dem Umfang, dass es zur Selbstzündung kommt.

Nach diesem Bild des Klopfvorganges ist der Ablauf der Vorreaktionen im von der Flammenfront noch nicht erreichten Gemischteil, dem Unverbrannten, von entscheidender Bedeutung. Nun ist die Untersuchung solcher Reaktionen schon in Verbrennungsbomben und den Glas- oder Quarzgefässen des Chemikers ausserordentlich schwierig, weil sie über eine grosse Zahl von kurzlebigen Zwischenprodukten laufen, die gleichzeitig vorhanden sind und deren Trennung schwierig ist. Selbst die Reaktionen einfacher Ausgangsstoffe sind überraschend mannigfaltig. (4). Noch schwieriger sind Untersuchungen am laufenden Motor mit technischen Kraftstoffen, da diese Gemische einer grossen Zahl verschiedener Kohlenwasserstoffe sind und da sich die Betriebsbedingungen eines Motors nicht so eindeutig festlegen lassen wie bei einem Laboratoriumsversuch. Trotzdem ist der Anreiz, unmittelbar am Motor zu messen, gross, weil man hoffen kann, rascher als mit reinen Laboratoriumsmethoden auf die motorische Praxis anwendbare Erkenntnisse zu finden. Denn gerade bei der Klopforschung spielen bei der Übertragung gewonnener Ergebnisse auf den Motor Zufälligkeiten und konstruktive und betriebliche Besonderheiten des einzelnen Motors

eine ausserordentliche Rolle.

Versuche über Vorreaktionen am laufenden Motor wurden mit Hilfe eines gesteuerten Gasentnahmeventils (5,6,7 u.a.) und durch spektroskopische Messungen (6,8) unternommen. Diese Versuche zeigten, dass sich im unverbrannten Gemisch zum Teil schon während der Verdichtungsperiode Aldehyde und Peroxyde bilden. Eine Zugabe von Peroxyden zum Kraftstoff in ausserordentlich geringer Menge fördert das Klopfen.

Die Entnahme von Gasproben aus dem Verbrennungsraum des Motors ist mechanisch schwierig und ihr Ergebnis für den Chemiker nicht immer befriedigend.

Auf ein anderes Verfahren weisen Broeze, van Driel und Peletier hin (9). Es wird von Peletier und Mitarbeitern (10) angewendet und besteht in der Messung des Druckverlaufes sowie der Auslasstemperatur an einem ohne Zündung fremd angetriebenen Motor.

II. Die Versuche von Peletier und seinen Mitarbeitern.

=====

Bei den Versuchen Peletiers (10), die sich an ältere Untersuchungen von Mondain-Monval (11,12) anschliessen, wurde ein CFR-Klopfprüfmotor bei einer Drehzahl von 900 Uml/min durch einen elektrischen Pendelmotor fremd angetrieben. Man liess den Motor auf 150°C vorgeheiztes Kraftstoff-Luft-Gemisch ansaugen, das er, ohne zu zünden, nach Verdichtung und Entspannungstakt wieder ausstliess. Die Temperatur des Motorkühlmittels betrug 125°C. Der Druckverlauf im Zylinder wurde mit einem optischen Indikator untersucht. Ausserdem wurde das zum Antrieb des Motors nötige Drehmoment gemessen.

Die aufgenommenen Diagramme zeigten eine Ausweitung auf der Expansionslinie infolge des Druckanstieges durch den Energieumsatz der Vorreaktionen. Diese Druckzunahme wuchs bis zu einem Kraftstoffüberschuss von 80 % über das stöchiometrisch richtige Mischungsverhältnis. Bei noch reicheren Gemischen konnte dagegen keine Wirkung erkannt werden. Das Dreh-

moment des treibenden Pendelmotors nahm mit wachsendem Mischungsverhältnis ab und zeigte bei dem Brennstoffverhältnis¹⁾ 1,8 ein Minimum von 29 omkg gegen 72 omkg beim Ansaugen von reiner Luft, d.h. die Abnahme betrug 60 %. Bei der Drehzahl von 900 Uml/min entspricht das einer von den Vorreaktionen ohne eigentliche Entzündung abgegebenen Leistung von 0,54 PS. Da der OFR-Motor eine Leistung von etwa 6 PS hat, wurden also bei dem angewendeten Mischungsverhältnis rund 9 % der gesamten Kraftstoffenergie umgesetzt.

Bei grösseren Brennstoffverhältnissen als 1,8 ging das Drehmoment nicht wieder ganz auf den Wert von reiner Luft hinauf. Peletier führt das auf die Änderung der spezifischen Wärme des Gemisches durch den hohen Kraftstoffanteil zurück.

Die Vorreaktionen waren bei genügender Stärke meistens von einem bläulichen Leuchten im Zylinder begleitet.

Damit war bewiesen, dass im Motorenzylinder chemische Reaktionen im unverbrannten Gemisch schon vor der Zündung in bemerkenswertem Umfang auftreten. Dabei hat der gesamte "Zündverzug" d.h. die Zeit vom Beginn der ersten Reaktionen bis zur völligen Entflammung etwa die gleiche Grösse wie die für die motorische Verbrennung überhaupt zur Verfügung stehende Zeit. Die Vorreaktionen können also durch den der Verdichtung folgenden Ausdehnungstakt d.h. durch Abkühlung gestoppt und ihre Produkte nahezu in dem gerade erreichten Zustand erhalten werden. Das folgt aus der Beobachtung, dass die Drucksteigerung im Zylinder während des Ausdehnungstaktes auftrat²⁾, obwohl natürlich die Vorreaktionen durch die adiabatische Erhitzung während der Verdichtung, spätestens also im o. Tpkt. eingeleitet werden.

1) Brennstoffverhältnis = Verhältnis der tatsächlichen Brennstoffmenge zu der bei stöchiometrischer Verbrennung erforderlichen.

2) Vgl. die in dieser Arbeit gebrachten Diagramme (Abb. 18 bis 21)

Weitere Versuche Peletiers zeigen den Einfluss des Kompressionsverhältnisses. Wie zu erwarten, wächst die Ausweitung des Diagramms, d.h. also der Umfang der Vorreaktionen, mit steigendem Verdichtungsverhältnis. Gleichzeitig rückt der Hauptbuckel im Diagramm näher an den oberen Totpunkt heran.

Während bei diesen Versuchen einheitlich ein aus 70 % Iso-Oktan und 30 % n-Heptan bestehender Kraftstoff verwendet worden war, wurde nun der Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung untersucht. Mit wachsendem Iso-Oktan-Anteil zeigen die Indikator diagramme immer weniger Druckgewinn in der Ausdehnungslinie, die Vorreaktionen vermindern sich also, wie man erwartet, mit wachsender Oktanzahl. Bleitetraäthyl verminderte ebenfalls die Vorreaktionen.

Leuchterscheinungen wurden in der Auspuffleitung nicht beobachtet, dagegen war der scharfe und kennzeichnende Geruch des Auspuffs bemerkenswert. Die Auspuffleitung war von einer braunen, zähen Schmiere überzogen.

Bei anderen Versuchen benutzte Peletier einen luftgekühlten Zweitaktmotor von 150 ccm, zwischen dessen Kühlrippen eine elektrische Heizung angebracht wurde. Das Verdichtungsverhältnis war 6, das angesaugte Gemisch wurde auf 150°C vorgewärmt. Die Temperatur des ausgestossenen Gemisches in Abhängigkeit von der Zylindertemperatur ergab eine Kurve mit wechselnder Steigung, während bei einem Gas ohne chemischen Umsatz eine gerade oder doch eine recht glatte Kurve zu erwarten wäre. Chemische Reaktionen wurden also auch auf diese Weise nachgewiesen. Hierbei zeigten sich Leuchterscheinungen bei Auslasstemperaturen von etwa 240 - 250°C und oberhalb etwa 490°C.

Das ausgestossene Gemisch wurde chemisch untersucht. Sein Kondensat trennte sich leicht in zwei Teile, von denen der erste hauptsächlich aus unverändertem Kraftstoff bestand und nur eine geringe Menge Peroxyde enthielt, während der zweite wasserlöslich war mit etwa 5 Gewichtsprozenten Peroxyden. Da der Anteil der wasserlöslichen Flüssigkeit

etwa 10 % des verbrauchten Kraftstoffes betrug, wurden also etwa 0,5 % des Kraftstoffgewichtes Peroxyde gefunden.

III. Neue Versuche über Vorreaktionen im Motor.

=====

a) Gesichtspunkte für das Versuchsprogramm.

Mit ihren Versuchen hatten Peletier und Mitarbeiter eine anschauliche und einfache Methode wieder aufgegriffen. Trotzdem in jedem warmen Motor, der Gemisch bei abgestellter Zündung ansaugt, - wie es im Kraftwagen beim Bergabfahren oft genug vorkommt - die Vorreaktionen in dieser Weise auftreten und mit einem Indikator, durch chemische Untersuchung des Auspuffs, am einfachsten aber mit einem Thermometer in der Auspuffleitung nachgewiesen und untersucht werden können, hat man bisher praktisch ausschliesslich Versuche entweder an reinen Laboratoriumsgeräten oder am klopfenden Motor unternommen. Während die ersteren nur sehr beschränkt auf motorische Verhältnisse übertragen werden können, muss bei den Klopfversuchen am Motor das Mischungsverhältnis in den engen Grenzen liegen, die durch die Notwendigkeit der ordnungsgemässen Zündung gegeben sind. Gerade die Versuche, über die im folgenden berichtet wird, zeigen aber, dass auch bei Mischungsverhältnissen weit ab vom stöchiometrischen Vorreaktionen auftreten, und dass der Überblick über einen grösseren Bereich von Mischungsverhältnissen neue und interessante Ergebnisse liefert. Die Möglichkeit, das Mischungsverhältnis weitgehend zu verändern, ist aber nur gegeben, wenn man auf eine Zündung wie im Motor verzichtet.

Peletier und Mitarbeiter griffen nur wenige Versuchswerte aus der Fülle der möglichen heraus. Sie untersuchten zwar den Einfluss des Verdichtungsverhältnisses, aber nur qualitativ mit dem Indikator und nur bei einem einzigen Mischungsverhältnis. Als Kraftstoffe wurden, von einer Ausnahme abgesehen, lediglich Mischungen aus Iso-Oktan und Heptan verwendet.

Es wurden deswegen neue Versuche unternommen, die an die Versuche von Peletier anschliessen, aber das Gesamtgebiet ausführlicher bearbeiten und die Abhängigkeit der Vorreaktionen vom Kraftstoff, vom Mischungsverhältnis, von der Drehzahl, vom Verdichtungsverhältnis und von der Temperatur des Motors und des angesaugten Gemisches in weiterem Bereich erkennen lassen sollen.

Als Mass des Umsatzes der Vorreaktionen diene die mit einem Thermometer gemessene Temperatursteigerung des Gemisches, sie ist auch für das Auftreten des Klopfens die wesentliche Veränderliche. Um den Einfluss der wechselnden Kolbenreibung oder sonstiger nicht genau zu beherrschender Betriebsbedingungen auszuschliessen, wurden neben Versuchen mit Kraftstoffdampf-Luft-Gemisch stets solche mit reiner Luft ausgeführt und die Temperatursteigerung des Gemisches von der Austrittstemperatur der reinen Luft an gezählt. Die Eintrittstemperatur wurde bei Gemisch und reiner Luft gleich gehalten. Zur Veranschaulichung wurden auch einige Indikatordiagramme aufgenommen.

b) Die Versuchsanordnung.

Als Versuchsmotor wurde der vom Forschungsinstitut für Kraftfahrzeuge und Fahrzeugmotoren a. d. Techn. Hochschule Stuttgart (Prof. Kamm) zur Untersuchung von Dieselmotoren nach dem Zündverzugsverfahren (13) entwickelte Kraftstoffprüfmotor (14) verwendet. Sein Verdichtungsverhältnis lässt sich in den weiten Grenzen von etwa 4,5 bis 25 verstellen. Am Zylinder und Zylinderkopf befinden sich insgesamt 4 Bohrungen, in denen Quarzdruckmessdosen für das Indizieren, Thermoelemente, Quarzfenster und andere Geräte befestigt werden können. Der Motor ist zusammen mit einem Gleichstrom-Pendeldynamo bzw. -motor und allem Zubehör wie Schmier- und Kühleinrichtung, Bremswiderständen, Tanks und Kraftstoffmessenrichtung usw. auf einem gemeinsamen Sockel montiert.

Die Daten des Motors sind:

Bohrung	101 mm
Hub	130 mm
Hubraum	1041 cm ³
Verdichtungsverhältnis	veränderlich
Betriebsdrehzahl	bis 2500 U/min
Steuerzeiten	veränderlich

Die für die Versuche einheitlich gewählten Steuerzeiten sind:

Auslass öffnet:	47° v.u. Tpkt.
Auslass schliesst:	70° n.o. Tpkt.
Einlass öffnet:	70° v.o. Tpkt.
Einlass schliesst:	47° n.u. Tpkt.

Ein- und Auslassnocken sind gleich.

Vergaser	Sum-Vergaser mit Verstelldüsen
Pendelmotor	Siemens-Schückertwerke, Typ A G 87
Fremderregung	220 V
Ankerspannung bei den Versuchen	400 V
Hebelarm der Drehmomentwägung	716,2 cm
Schmieröl	Aeroshell Mittel
Öldruck	2,4 atü

Die Schmierölmenge wurde während der Versuche auf 6 l konstant gehalten.

Der Zylinderkopf mit dem Verbrennungsraum ist auf Abb. 1 dargestellt. Zylinder und Zylinderkopf bestehen aus Guss-eisen mit eingegossenen Kühlkanälen. Der Kolben ist aus Leichtmetall geschmiedet mit flachem Boden. Die Form des Verbrennungsraumes ist, von unwesentlichen Vertiefungen abgesehen, ein flacher Kreiszyylinder. Ein- und Auslassventil sind gleich. Die Gaskanäle im Zylinderkopf haben die übliche Form eines Krümmers von etwa 90° Umlenkung.

Für die Versuche musste der Motor umgebaut werden. Insbesondere wurden Ansaug- und Auspuffleitung geändert und sorgfältig durchgebildete Temperaturmessgeräte in ihnen angeordnet. Die gesamte Anlage ist auf Abb. 2 dargestellt.

1) Saugleitung und Gemischbildung.

Die Luft wird aus unter der Versuchshalle liegenden Kanälen mit recht gleichmässiger Temperatur bei A angesaugt, wobei ihre Temperatur durch das Thermometer B gemessen wird. Sie passiert den nach dem Prinzip des Roots-Gebläses arbeitenden Kammerluftmengenmesser C und tritt in den Druckausgleichskessel D von $0,1 \text{ m}^3$ ein. Durch eine $0,7 \text{ m}$ lange Leitung von 65 mm \varnothing , in die eine an die Lichtleitung angeschlossene Heizwicklung von 2 kW (E) und eine zweite durch Vorschaltwiderstand regelbare Heizung (F) eingebaut sind, wird sie zum Vergaser (G) geführt. Dieser ist ein Sum-Vergaser mit verstellbaren Düsen, dessen Drehschieberdrossel im allgemeinen voll offen stand. Hinter dem Vergaser hat die Leitung zwei Umlenkungen von 90° , um mitgerissene Kraftstofftröpfchen auszuschleudern und nicht auf das $0,85 \text{ m}$ hinter dem Vergaser angeordnete Thermometer H treffen zu lassen. Vom Vergaser bis zum Motor war die Leitung sehr reichlich mit Aluminium-Folie und Asbest isoliert.

Zur Messung der Gemisch- Ein- und Austrittstemperatur wurden Glasthermometer der Normalqualität mit $1/2^\circ$ -Teilung gewählt, die sich bei der Eichung in den Grenzen der Ablesbarkeit als völlig genau zeigten. Es wurde darauf geachtet, dass die Ablesungsstelle nur wenig über den Wärmeschutz des Rohres hinausragte, sodass auf die Fadenkorrektur verzichtet werden konnte. Zudem wurden die Angaben der Thermometer nur zur Differenzbildung verwertet.

Um mit dem Ansaug- und entsprechend mit dem Auspuff-Thermometer zeitlich und über den Rohrquerschnitt gut zu mitteln und gleichzeitig den Einfluss der Wärmestrahlung zu unterdrücken, steckten diese Thermometer in Rippenfühlern (J, K) (Abb. 3) aus Leichtmetall, die gegen das Rohr durch Luftspalt bzw. an der Befestigungsstelle durch etwas Fiber isoliert waren. Da auch das Rohr gegen die Umgebung und gegen den Zylinderkopf (der übrigens ansaugseitig meist die gleiche Temperatur hatte) gut isoliert war, hatte es praktisch die gleiche Temperatur wie das Gemisch. Die Tempera-

turmessung kann daher als so genau angesehen werden, wie die Ablesbarkeit des Thermometers, d.h. auf sicher $\pm 0,2^\circ$.

In Strömungsrichtung 6 cm vor dem Rippenfühler, war in dem Rohrknief ein einfaches zweites Thermometer (L)nackt im Luftstrom angeordnet. Dieses Thermometer zeigte fast stets dasselbe an wie das im Rippenfühler. Der Zweck des vorgeschalteten Thermometers war, das Einregeln der richtigen Einlasstemperatur nach diesen schnellen Temperaturänderungen rascher folgenden Instrument zu beschleunigen.

In die Ansaugleitung war ein elastisches Stück Buna-schlauch eingeschaltet, um die Höhenverschiebung des Zylinders bei der Änderung der Verdichtung auszugleichen. Der Gummi hat die ganze Zeit (etwa 625 Betriebsstunden) bei 140°C und mehr ausgehalten.

2) Auspuffleitung.

Die Auspuffleitung hatte wie die Saugleitung ebenfalls 65 mm Durchmesser. Sie war auf 90 cm Länge isoliert. Das Auslassthermometer (M) war von gleicher Ausführung wie das Einlassthermometer und sass in einem gleichen Rippenfühler (K). In die Auspuffleitung war an einer Abzweigung ein Ventil (O) eingeschaltet, sodass zur Beobachtung etwas Abgas ins Freie treten konnte. Ferner enthielt die Auslassleitung ein elastisches Federrohrstück zum Ausgleich der Verdichtungsverstellung. Die Leitung mündete in ein Rohr von 200 mm \varnothing (P), durch das mit Hilfe eines Gebläses (\surd) Luft angesaugt wurde. Dadurch vermischten sich die Abgase mit einer so grossen Menge Luft, dass sie bis auf etwa 30°C abgekühlt und stark verdünnt werden. So wurde die Ansammlung grosser Mengen heisser und wegen der Vorreaktionen an Radikalen reichen und daher zündfähigen Gemisches vermieden. Zugleich sollte das Gebläse in der Auslassleitung einen gewissen Unterdruck herstellen. Da nämlich infolge der Widerstände in der Saugleitung vor dem Motor stets ein Unterdruck von etwa 180 mm Wassersäule herrschte, erschien es

zweckmässig, zur Vermeidung einer Beeinflussung der Spülung den Druck in der Auspuffleitung dem in der Saugleitung möglichst anzugleichen. Dazu hätte allerdings das Gebläse regelbar eingerichtet werden müssen, auch hätte das verwendete, das erst bei ziemlicher Drosselung einen Maximalunterdruck von 320 mm W.S. erreichte, nicht ausgereicht. Da Kontrollversuche aber zeigten, dass bei der geringen Überschneidung der Ventilöffnungszeiten von nur 2 mal 7° Kurbelwinkel der Einfluss einer mässigen Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass vernachlässigt werden konnte, wurde auf diese Komplizierung der Anlage verzichtet. Der Druck in der Ein- und Auslassleitung wurde unmittelbar vor bzw. hinter dem Zylinderkopf mit je einem wassergefüllten U-Rohr (R,S) gemessen.

Es wurde darauf verzichtet, den Druck in der Ansaugleitung bei allen Versuchen konstant zu halten, obwohl an sich der Druck bei Kompressionsbeginn durchaus von Einfluss auf die Vorreaktionen ist, wie die Versuche zeigen. Der Barometerstand sowie die beobachtete kleine Änderung des Ansaugdruckes mit wachsenden Vorreaktionen beeinflussen also die Versuchsergebnisse etwas. Da aber die Änderung der Vorreaktionen bei Veränderung der Ansaugtemperatur oder des Verdichtungsverhältnisses wesentlich grösser waren, als diese Einflüsse, stören sie das Bild praktisch nicht.

3) Anlagen für Kraftstoff, Schmieröl, Kühlmittel.

Der Kraftstoffverbrauch wurde in üblicher Weise mit einem geeichten Glasgefäss, also volumetrisch, gemessen. Da sich dieses Messgefäss aus Platzgründen über dem heissen Motor befinden musste, erwärmte sich der Kraftstoff darin auf 25 bis 35°C . Deswegen wurde in das Messgefäss ein Thermometer (T) eingeschmolzen und in die Berechnung des verbrauchten Kraftstoffgewichtes das der abgelesenen Temperatur entsprechende spezifische Gewicht eingesetzt. Die Kraftstoffwichte wurde mit Aräometern bestimmt.

Das Schmieröl, Aeroshell Mittel, wurde durch Frischwas-

ser mit Hilfe einer im Kurbelgehäuse liegenden wasser- durchflossenen Rohrschlange rückgekühlt. Der Öldruck wurde auf 2,4 atü konstant gehalten, die Öltemperatur, im Kurbelgehäuse mit einem Quecksilberfernthermometer gemessen, auf 75°C. Der Einfluss dieser Betriebsgrößen auf die Versuchswerte dürfte verschwindend sein, da das Kraftstoff-Luftgemisch nur mit solchen Ölteilchen in Berührung kommt, die am Zylinder und am Kopf haften und infolgedessen deren Temperatur angenommen haben. Wichtiger war dagegen das Konstanthalten der Öltemperatur mit Rücksicht auf die merkliche Beeinflussung des Drehmomentes.

Als Kühlmittel wurde technisches Äthylenglykol verwendet, da bei den mit Wasser erreichbaren Temperaturen noch keine genügenden Vorreaktionen entstanden. Das Glykol wurde durch eine kleine Kreiselpumpe (ü), die von einem besonderen Elektromotor angetrieben wurde, umgewälzt. Um das Kühlmittel und damit den ganzen Motor auf der gewünschten Temperatur zu halten, war eine ziemlich kräftige elektrische Heizung (X) von 2 kW notwendig, die beim Anheizen auf etwa 6 kW verstärkt werden konnte. Für diese Heizung waren die Kühlmittelleitungsrohre zunächst mit Asbestpappe umwickelt, auf die Chromnickelwiderstandsdraht gewickelt war. Darüber folgten Aluminiumfolien mit losen Asbestschnüren als Abstandhalter. Die Isolation in dieser Weise erschien recht gut.

Am Ein- und Austritt des Glykols in den bzw. aus dem Zylinder wurde die Temperatur mit in 1/10°C geteilten Normalthermometern (Y) gemessen. Die Anzeigen unterschieden sich fast nie um mehr als 0,2°C, sodass man die Temperatur vom Zylinder und Zylinderkopf als hinreichend gleichmäßig annehmen kann. Hierbei war die umgewälzte Glykolvmenge etwa 0,2 kg/s.

4) Antriebsanlage.

Der Pendelmotor (V), der nur zum Anwerfen des Motors gedacht war, musste mit einer erhöhten Ankerspannung von

400 V betrieben werden, da mit 220 V höhere Drehzahlen nicht erreicht werden konnten. Hierzu mussten 2 Gleichstromgeneratoren hintereinander geschaltet werden. Die Ankerspannung von 400 V wurde durch Regelung der Felderregung des zweiten Generators stets konstant gehalten. Auf diese Weise war der von der Pendelmaschine aufgenommene Ankerstrom ein Anhalt für das Drehmoment.

Das Drehmoment wurde durch Auswiegen mit Gewichten gemessen. Da die Drehzahl in den meisten Fällen 1800 U/min war, wurde die Lüfterleistung nicht abgezogen, da es nur auf Vergleiche ankam. Die gemessenen Drehmomentwerte haben also nur relative Bedeutung.

5) Angaben über die Betriebsbedingungen und Bezeichnungen.

Bei den Versuchen kam es darauf an, den Motor unter möglichst gleichbleibenden Bedingungen zu fahren. Es wurden daher bei allen Versuchen folgende Werte konstant gehalten:

Öltemperatur	75°C
Öldruck	2,4 atü
Kühlmittelumlaufmenge	etwa 0,2 kg/s
Ankerspannung	400 V
Ventilzeiten (vgl. S.10)	

Die meisten Versuche betreffen die Abhängigkeit der Vorreaktionen vom Kraftstoff und dem Mischungsverhältnis. Hierfür wurden konstant gehalten:

Drehzahl	1800 Uml/min
Ansaugtemperatur von Luft und Gemisch	140°C
Kühlmitteltemperatur	140°C
Der Unterdruck in Saug- und Auspuffleitung	Saugdrossel voll offen, Absaugegebläse konstante Drehzahl.

Bei der Auswertung der Versuche und in den Kurvendarstellungen sind folgende Bezeichnungen benutzt:

ϵ	Verdichtungsverhältnis = $\frac{\text{Gesamtvolumen}}{\text{Verbrennungsraumvolumen}}$	
ϵ_w	Verdichtungsverhältnis unter Berücksichtigung des nicht im Totpunkt erfolgenden Ventilschlusses	
$\Delta\epsilon$	$= \epsilon - \epsilon_w$	
Md	Drehmoment zum Antrieb des Motors, gemessen durch das Gewicht am Hebelarm der Pendelmaschine	kg
ΔMd	Abnahme des Drehmomentes durch Vorreaktionen	kg
n	Drehzahl	U/min
t_{La}	Luftaustrittstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
t_{Le}	Luft Eintrittstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
t_{Ga}	Gemischaustrittstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
t_{Ge}	Gemischeintrittstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t_{GL} = t_{Ga} - t_{La}$	Temperaturdifferenz infolge Vorreaktionen	$^{\circ}\text{C}$
t_K	Kühlmitteltemperatur	
G_B	Gewichtsmenge des Brennstoffes	kg/s
G_L	Gewichtsmenge der Luft	kg/s
m	Mischungsverhältnis = $\frac{G_L}{G_B}$	kg/kg
m_{th}	stöchiometrisches Mischungsverhältnis	kg/kg
λ	Luftverhältnis = $\frac{G_L}{G_B} \cdot \frac{1}{m_{th}}$	
β	Brennstoffverhältnis	
t_v	Verdichtungsendtemperatur	$^{\circ}\text{C}$
x	Kolbenweg	mm
b_{ein}	Differenzdruck im Einlass gegen die Atmosphäre	mm H ₂ O
OZ	Oktanzahl	
t	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
p	Druck	kg/cm ²
		} laufende Veränderliche

c) Durchführung der Versuche.

Durch Vorversuche wurde zunächst das Gebiet abgegrenzt, in dem überhaupt in der geplanten Weise mit dem Thermometer messbare Vorreaktionen auftraten. Auf Grund dieser Versuche wurden die oben genannten Betriebsbedingungen festgelegt.

Vor jeder Versuchsreihe wurde nach genügendem Einlaufen und nach Erreichen des Temperaturgleichgewichts ein Versuch mit Ansaugen von reiner Luft gefahren. War als Lufttrittstemperatur $t_{Le} = 140^{\circ}\text{C}$ gewählt, so betrug die Luftaustrittstemperatur bei 1800 Uml/min und $t_K = 140^{\circ}\text{C}$ bei Verdichtungsverhältnissen um 6 etwa $t_{La} = 145^{\circ}\text{C}$. Dieser Wert schwankte von Tag zu Tag etwas, vermutlich infolge kleiner Veränderungen am Motor und musste jeweils neu bestimmt werden. Bei Beginn der Versuche lag er wesentlich niedriger, etwa bei $t_{La} = 137^{\circ}\text{C}$. Es ist denkbar, dass durch die zunehmende Abnutzung des Kolbens und der Kolbenringe der Wärmeübergang vom Kolben an den Zylinder erschwert wurde, sodass der Kolben später heißer blieb. Messungen ergaben allerdings nach ca. 250 Stunden nur eine Abnutzung des Kolbens von 1/100 mm im Durchmesser.

Der Beharrungszustand stellte sich nur recht langsam ein. Vom ersten Anheizen bis zum Ablesen des Messpunktes mit reiner Luft vergingen gewöhnlich zwei Stunden. Jeder einzelne Versuch mit einem bestimmten Betriebszustand brauchte durchschnittlich etwa 45 Minuten.

Nachdem die Austrittstemperatur bei Betrieb mit Luft gemessen war, wurde durch Öffnen der Vergaserdüsen mehr und mehr Kraftstoff zugegeben. Dabei wurde die Eintrittstemperatur t_{Ge} konstant (meistens 140°) gehalten. Infolge der Vorreaktionen stieg nun die Auslasstemperatur t_{Ga} . Als Ergebnis eines Einzelversuches galt die Temperaturdifferenz

$$\Delta t_{GL} = t_{Ga} - t_{La}$$

Die Kurvenblätter zeigen diese Temperaturdifferenz meistens dargestellt über dem Mischungsverhältnis.

Es wurde davon abgesehen, mit der "Luftüberschusszahl" λ zu arbeiten, nicht nur, weil dieser Ausdruck an sich schlecht gewählt ist (15), sondern weil ein Luftüberschuss ein ungeeigneter Begriff ist, wenn überhaupt keine richtige Verbrennung stattfindet. Dem Verfahren, einer in erster Annäherung konstanten Luftmenge mehr und mehr Brennstoff zuzusetzen, entsprach es am meisten, mit dem Brennstoffverhältnis $\beta = \frac{G_2 \cdot m_{th}}{G_1}$ zu arbeiten.

β wächst mit steigendem Brennstoffanteil und ist gleich 1 im Falle stöchiometrischen Gemisches. Im übrigen gilt

$$\beta = \frac{1}{\lambda}$$

Der Mindestsauerstoffbedarf, d.h. das stöchiometrisch richtige Mischungsverhältnis mit Luft m_{th} wurde aus chemischen Analysen bestimmt, die die Anteile der Kraftstoffe an Alkoholen, Olefinen, Aromaten und Bleitetraäthyl gaben. Für die Aromaten wurde angenommen, dass es sich um Benzol handle, was das wahrscheinlichste ist. Für den nach Abzug der Aromaten und des Alkohols übrig bleibenden Rest des Kraftstoffes (Paraffine, Olefine und sonstige) wurde das in der Hütte 26. Aufl. Bd. I S. 575 für "Benzin" angegebene stöchiometrische Mischungsverhältnis m_{th} zu 15,0 kg Luft/kg Kraftstoff angenommen. Bekanntlich ist der Einfluss des Molekulargewichtes auf das stöchiometrische Mischungsverhältnis gering, sodass diese Methode für genügend gehalten wurde. Das Mischungsverhältnis für einen Kraftstoff wurde dann entsprechend der durch die chemische Analyse gefundenen Anteile an Alkohol und Aromaten bestimmt.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist Zahlentafel 1 (S. 19). Hierin bedeutet --, dass der betreffende Wert nicht ermittelt wurde, während 0 angibt, dass kein solcher Bestandteil vorhanden ist. Die Analysenwerte des IG - Eichbenzins stammen von der IG Farbenindustrie A.G., die auch dankenswerterweise die wirklichen Oktanzahlen einiger Brennstoffe bestimmte (in der Tabelle: Oktanzahl nach IG), die sich z.T. von den "Nennoktanzahlen", mit denen sie im Handel geführt

Kraftsto Nr.	Naphtene	Bleitetraäthyl	theor. Mischgs.-
			verh. mth kg Luft/kg Kraft- stoff
1	-	0	14,88
2	-	0	14,94
3	-	0,07	14,71
4	43,7	0,08	14,85
5	44,2	0,09	14,86
6	-	0,08	14,32
7	0	0	15,18
8	0	0	3,04
9	0	0	13,33 ⁷⁾
10	20,0	0	15,0
11	20,0	0,1	15,0
12	20,0	0,1	15,0
13	-	0,085	14,94

-und Verbrennungsvorgänge in Gasen,"
550

n der I.G.

Zahlentafel 1

(twas Toluol).

6360

Tabelle der untersuchten Kraftstoffe.

Kraftstoff Nr.	Art des Kraftstoffes	Oktanzahl ⁸⁾		Anteile Vol.-%							theor. Mischgs. - verb. Mth kg Luft/kg Kraft- stoff
		Nenn-O.Z. Motor- Methode	nach I.G. ⁹⁾ Methode	Alkohol	Olefine	Paraffine	Aromaten	Naphtene	Bleitetraäthyl		
1	handelsübl. "Grund"-Benz.	58	56,4	0	8	-	7,3	-	0	14,88	
2	ungebleit. Flieg.-Benz.	74	72,0	0	5	-	4,1	-	0	14,94	
3	Flieger- kraftst. I	87	-	-	3	-	17,0	-	0,07	14,71	
4	Flieger- kraftst. II	87	88,1	-	4	-	9,0	43,7	0,08	14,85	
5	Flieger- kraftst. III	87	90,6	-	3,5	-	8,5	44,2	0,09	14,86	
6	Sonder- kraftstoff	100	-	0	2	-	40,0	-	0,08	14,32	
7	Isooktan rein	100	-	0	0	100	0	0	0	15,18	
8	Äthylalkohol	39,54)	-	39,9	0	0	0	0	0	9,04	
9	Benzol techn. rein	100 ⁵⁾	-	0	0	0	100,0	0	0	13,337)	
10	Trichbenzin ⁶⁾ d. I.G. (IG7)	44,6	44,6	0	0,6	77	2,4	20,0	0	15,0	
11	IG-Trichbenz. ¹⁾ + 1 cm ³ /l Pb(.....)	74,52)	73,1	0	0,6	77	2,4	20,0	0,1	15,0	
12	IG-Trichbenz. + 1,53 cm ³ /l Pb(.....)	74,52)	73,2	0	0,6	77	2,4	20,0	0,1	15,0	
13	Kraftstoff Nr. 2 + 1,3 cm ³ /l Äthyl	87	87,0	0	5	-	4,1	-	0,085	14,94	

1) 1 cm³ Pb(C₂H₅)₄ sind enthalten in 1,53 cm³ = 0,655 cm³ Äthylfluid.

2) Nach I.O.-Kurve TPr S 033 a.

3) 1,3 cm³ Äthylfluid enthalten 0,03 cm³ Pb(C₂H₅)₄. Dies ist die in Fliegerkraftstoff meist enthaltene Menge

4) Nach W. Jout: "Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen," Berlin, Springer, 1939, S. 550

5) Extrapoliert aus Angaben der I.O.

6) Nach Angaben der I.O.

7) für Techn. Benzol (mit etwas Toluol).

8) Nach Motormethode.

9) Gem I.G.-Motor bestimmt.

werden, erheblich unterscheiden.

Das Verdichtungsverhältnis, das in den Ergebnissen meistens als Parameter auftritt, wurde in der üblichen Weise angegeben, d.h. als Verhältnis der Zylinderinhalte an den beiden Totpunkten. In Wirklichkeit allerdings findet während des ersten Teiles des Kolbenhubes keine Kompression statt, da das Einlassventil erst 47 Grad Kurbelwinkel nach dem unteren Totpunkt geschlossen ist. Obwohl infolgedessen rechnerisch von Verdichtungsverhältnissen um 6 bei den gewählten Steuerzeiten etwas mehr als eine halbe Einheit abziehen wäre, wurde als Verdichtungsverhältnis jeweils das übliche angegeben. Soweit thermodynamische Rechnungen angeschlossen wurden, musste aber auf das in Wirklichkeit andere Verdichtungsverhältnis geachtet werden, und es wurde mit ϵ_w gerechnet. In Zahlentafel 2 sind das übliche Verdichtungsverhältnis ϵ und das einem Schliessen des Auslassventils 47° nach dem unteren Totpunkt entsprechende wahre Verdichtungsverhältnis ϵ_w einander gegenüber gestellt.

Zahlentafel 2

ϵ übl. Angab.	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0
$\Delta\epsilon$	0,478	0,538	0,598	0,658	0,717	0,777	0,837	0,956	1,076
ϵ_w	4,522	4,962	5,402	5,842	6,283	6,723	7,163	8,044	8,924

Wenn durch die Vorreaktionen Temperaturen von etwa 200 bis 210°C im Auslass überschritten wurden, traten mehr oder weniger heftige Explosionen auf, und zwar im allgemeinen zunächst im Auspuffrohr, bei weiterer Steigerung der dem Gemisch zugeführten Wärme (durch Heizung oder Verdichtungssteigerung) aber unmittelbar anschliessend auch im Zylinder. Im Auspuffrohr bestanden diese Explosionen nur in einem harmlosen Knallen. Im Zylinder waren sie dagegen teilweise recht heftig und entsprachen durchaus harten Klopfstössen. Der Vorgang ist chemisch-physikalisch zweifellos von der gleichen Art, wie die klopfende Verbrennung im Motor. Ein Unterschied besteht nur insofern, als im klopfenden Motor nur ein Gemisch-

rest unter Selbstzündung durch adiabatische Verdichtung verbrennt, während bei diesen Fremdantrieb-Versuchen praktisch der ganze Zylinderinhalt gleichzeitig zündet.

Nach solchen Explosionen, - sei es im Auspuffrohr oder im Zylinder, - mussten die Messungen jedesmal abgebrochen werden, da die freiwerdende Wärme die Auspuffleitung mit dem Thermometer sowie den Motor selbst aufheizte und infolgedessen weiterhin erst recht Selbstzündungen auftraten.

Hiergegen half auch sofortiges Abstellen des Brennstoffes nicht, da der Motor erst den Inhalt der Vergaserschwimmerkammer verbrauchen musste. Meistens verstärkte sich das Knallen im Zylinder sehr rasch und der Motor begann knallend selbst zu laufen. Die einzige, meist auch sehr wirksame Abhilfe bestand darin, ihn vom Antrieb her schneller laufen zu lassen. Eine Drehzahlerhöhung von 200 Uml/min beseitigte die Selbstzündungen meist sofort, was ebenfalls für denselben reaktionskinetischen Mechanismus sowohl der Selbstzündung wie des Klopfens spricht, denn auch das Klopfen kann durch Schnellerlaufenlassen des Motors beseitigt werden, soweit damit nicht eine merkliche Erhöhung der Last und damit der Erwärmung verbunden ist.

Gelegentlich lief der Motor von selbst, mit abgestelltem Antrieb, ohne jedes Geräusch im Leerlauf, also lediglich mit Hilfe der Vorreaktionen.

Leuchterscheinungen im Zylinder konnten mit Hilfe des am Motor vorgesehenen Quarzfensters nicht beobachtet werden.¹⁾ Es mag sein, dass sehr schwaches Leuchten auftrat, - nach den Arbeiten Peletiers muss man es erwarten - aber das Quarzfenster war nach kurzer Zeit völlig verölt. Wollte man es erst einsetzen, nachdem Beharrungszustand erreicht war, so musste der Motor angehalten werden. Das bedeutete eine Unterbrechung von mindestens einer halben Stunde. Hatte man nach dieser Zeit den Beharrungszustand abermals erreicht, so war das Quarzfenster von neuem verölt.

1) Eine Ausnahme vergl. S. 45

Entsprechend dem Zweck der Versuche, das Gesamtgebiet quantitativ zu umgrenzen, wurde auf weitere Bemühungen in dieser Richtung verzichtet.

Um den Einfluss einer Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslassrohr möglichst auszuschalten, war die Ventilzeiten-Überschneidung auf 2 mal 7 Grad Kurbelwinkel beschränkt worden. Um zu prüfen, ob höherer Gegendruck in der Auspuffleitung die Auslasstemperatur änderte, wurde die Auslassleitung etwas gedrosselt. Der so gemessene Wert fiel befriedigend in die entsprechende Kurve mit normalem Auslassdruck hinein. Die Vorreaktionen wurden also durch verschiedene Spülverhältnisse nicht merklich beeinflusst.

Es wäre denkbar, dass die Vorreaktionen nicht erst durch die Temperatursteigerung bei der Verdichtung, sondern schon durch die Erwärmung auf die Einlasstemperatur ange-regt werden. Da bei der Strömung vom Einlassthermometer bis zum Auslassthermometer eine wesentlich grössere Zeit zur Verfügung steht, als für den Verdichtungsakt allein, könnte ein Energieumsatz und damit eine Temperaturerhöhung auch schon ohne Verdichtung eintreten. Dies würde etwa der Versuchseinrichtung von Peletier (Quarzrohrversuche (10)) oder auch den Vorversuchen von Mondain-Monval (vgl. (11) und (12)) entsprechen, der im heissen Auspuffrohr eines warmgefahrenen Automobilmotors, aber meist noch nicht unmittelbar hinter dem Zylinder, Vorreaktionen festgestellt hatte. Um diese Verhältnisse zu prüfen, wurden zwei besondere Kooken eingebaut, die die Ventile in gleicher Weise wie sonst, aber bei jeder Umdrehung statt bei jeder zweiten Umdrehung, öffneten, sodass also der Motor wie eine Kolbenpumpe wirkte. Dabei ergab sich keine Temperaturdifferenz zwischen dem Betrieb mit Luft und mit Gemisch. Die Vorreaktionen werden also durch die Erhit-zung auf 140° in der Saugleitung und im Zylinder auch bei Berücksichtigung der verhältnismässig langen Verweilzeit noch nicht angeregt.

d) Die Genauigkeit der Messwerte.

Das Bestreben, möglichste Genauigkeit zu erzielen, fand an den nie vollkommen definierbaren motorischen Verhältnissen eine Grenze. Es muss zugegeben werden, dass für die beobachteten Differenzen einiger Messwerte von einem Versuch zum anderen zweifelsfreie Erklärungen nicht immer gegeben werden konnten. Besonders gilt das für die Austrittstemperaturen bei den Versuchen mit reiner Luft, die an verschiedenen Tagen und zunehmend mit der Versuchsdauer stets etwas anders ausfiel. Man muss aber dabei bedenken, dass auf diese Temperatur fast alle Betriebsbedingungen irgendwie von Einfluss sind. Das Konstanthalten sämtlicher Werte nicht nur innerhalb einer Versuchsreihe, sondern über Hunderte von Betriebsstunden ist aber sehr schwer. Dadurch, dass die Luftaustrittstemperatur jedesmal neu bestimmt wurde, ist aber der Fehler soweit wie möglich verkleinert. Die etwas ungenügende Reproduzierbarkeit - vor allem über längere Zeiträume gesehen - gilt auch für die Messung des Drehmomentes bei Betrieb mit Luft. Glücklicherweise war aber die Reproduzierbarkeit erheblich besser für die Temperaturdifferenz Δt_{GL} ebenso wie für die Differenz zwischen dem Drehmoment bei Luftbetrieb und bei Gemischbetrieb. Bei der Differenzbildung fallen also die unkontrollierbaren Fehler weitgehend heraus.

Die Gemisch- bzw. Luftertrittstemperatur konnte auf $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ genau eingestellt und wiederholt werden. Alle anderen Werte liessen sich so genau einstellen, dass eine merkliche Beeinflussung der Vorreaktionen durch Ungenauigkeit nicht festgestellt werden konnte.

Unter diesen Umständen gilt für die Genauigkeit der Messungen etwa folgendes:

- 1) Ablesbarkeit der Ein- und Auslassthermometer für einen einzelnen Versuch $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
- 2) Demnach möglicher Fehler für Δt_{GL} während eines Versuches $0,4^{\circ}\text{C}$
- 3) Mögliche Abweichung von Δt_{GL} von einem Versuch zum anderen d.h. die beim Auftragen einer Kurve sichtbaren Fehler $0,6 \text{ bis } 0,8^{\circ}\text{C}$

In einzelnen Fällen ist der Fehler grösser gewesen. Dann lag jedesmal eine auffindbare Ursache vor. Wenn jedoch der Kurvenverlauf an sich klar war, wurde gelegentlich auf Wiederholung verzichtet.

- 4) Mögliche Abweichung von Δt_{GL} nach mehreren Versuchsreihen infolge Veränderung des Motorzustandes

$\pm 1 - 2^\circ$

Nach sehr langer Zeit war die Reproduzierbarkeit in einigen Fällen auch schlechter. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass Veränderungen des aufbewahrten Brennstoffes daran Schuld tragen. Im allgemeinen konnten alle Versuchspunkte auf $2^\circ C$, meist sogar auf weniger als $1^\circ C$ reproduziert werden.

- 5) Genauigkeit der Bestimmung des Brennstoffverhältnisses

$\pm 1/2 \%$

- 6) Genauigkeit der Drehmomentmessung

$\pm 0,02 \text{ kg}$

(Gewicht an Hebelarm)

- 7) Die Reproduzierbarkeit der Drehmomentmessung betrug nur etwa $\pm 0,1 \text{ kg}$, da der Zustand des Schmieröles von starkem Einfluss war. Doch ist dies für die Versuchswerte nicht von Belang.

Im ganzen ist aber die Genauigkeit bemerkenswert, mit der die Kurven wiederholt werden konnten. Auch der Abfall vom Maximum bei hohen Verdichtungsverhältnissen bis auf fast Null liess sich in beiden Richtungen stets wiederholen und ergab immer dasselbe Resultat. Am besten war die Reproduktionsgenauigkeit auf dem ansteigenden Ast, wo sich die Punkte auch ruhig und bequem einstellen liessen.

e) Ergebnisse

1) Verdichtungshöchsttemperatur

Die Ergebnisse sind in den Kurvenblättern Abb. 5 bis 17 dargestellt. Damit zu jedem Kurvenpunkt leicht die im Motor erreichte höchste Temperatur abgeschätzt werden kann, ist eine Kurventafel beigegeben (Abb. 4), die für verschiedene Verdich-

tungsverhältnisse¹⁾ die höchsten bei Annahme adiabatischer Verdichtung im oberen Totpunkt auftretenden Temperaturen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis angibt. Diese Kurven sind für Oktan als für die Versuche typischen Kraftstoff unter Vernachlässigung der Wärmeverluste berechnet, mit Werten für das Verhältnis der spezifischen Wärmen, die nach G. Damköhler (18) für eine Temperatur von 500°C ermittelt und in Zahlentafel 3 für verschiedene Brennstoffverhältnisse angegeben sind.

β	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
κ	1,360	1,322	1,298	1,274	1,252	1,239	1,225	1,211	1,200

Zahlentafel 3

Tabelle der Verdichtungsexponenten κ
für ein Gemisch mit dem Brennstoffverhältnis β

Die Kurven zeigen eine recht beträchtliche Änderung der Verdichtungsendtemperatur mit dem Mischungsverhältnis. Die wirklichen Höchsttemperaturen im Zylinder sind wegen der Wärmeverluste etwas geringer.

2) Typisches Verhalten von Fliegerkraftstoffen.

Einen typischen Verlauf der Vorreaktionen zeigen die Versuche mit dem Kraftstoff Nr. 3²⁾, einem handelsüblichen verbreiteten Fliegerkraftstoff der Nennoktanzahl 87 (Abb. 5)³⁾. Abb. 6 zeigt die gleichen Versuchsergebnisse⁴⁾ in auseinandergezogener Darstellung, sodass sich die Zuordnung der Messpunkte

- 1) In die Rechnung wurden die wahren Verdichtungsverhältnisse nach Zahlentafel 2 (S. 21) eingesetzt, aber das übliche angeschrieben.
- 2) Die Kraftstoffnummern beziehen sich auf Zahlentafel 1, S. 19
- 3) Auf die an die Kurven angeschriebenen Zahlen (Temperaturen in °C) wird später eingegangen.
- 4) Abb. 6 enthält die Messpunkte, während sie in Abb. 5 der Übersichtlichkeit wegen weggelassen sind.

te zu den einzelnen Kurven erkennen lässt. Die Ordinatenbeschriftung gilt für den Kurvenbeginn im Nullpunkt.

Mit wachsendem Brennstoffverhältnis β steigen die Kurven der Temperatursteigerung Δt_{GL} durch Vorreaktionen an, erreichen ein Maximum und fallen dann wieder ab, und zwar bei höheren Verdichtungsverhältnissen immer steiler, bis schliesslich der Abbruch der Vorreaktionen praktisch völlig plötzlich ist.

Die Messpunkte bei hohen und bei verschwundenen Vorreaktionen liegen indessen stets ein gewisses Stück der Abszisse auseinander. Zwischenpunkte liessen sich nicht einstellen, da die Strömungsverhältnisse im Motor infolge der Volumenvergrösserung durch die Vorreaktionen beeinflusst wurden, sodass sich nach Abwarten des Beharrungszustandes immer entweder der obere etwas links der Sprungstelle oder der untere Punkt etwas rechts davon ergab.

Die Stelle des Maximums wandert mit steigenden Verdichtungsverhältnissen weiter nach dem Gebiet grösserer Brennstoffverhältnisse, also reicherer Mischungen. Die Kurven zeigen weiter in Übereinstimmung mit den Ergebnissen entsprechender Versuche mit anderen Kraftstoffen im Gebiet der ansteigenden Kurvenäste eine Unterschneidung der Kurven mit niederen Verdichtungsverhältnissen durch die mit höheren, sodass in diesem Gebiet bei wachsendem Verdichtungsgrad, d.h. wachsender Temperatur geringere Vorreaktionen auftreten.

Bei hohen Mischungsverhältnissen gehen die Kurven nicht auf Null zurück. Ob diese Erscheinung auf Vorreaktionen besonderer Art oder auf Unterschiede der Wärmeübergangsverhältnisse des Gemisches und die reiner Luft zurückzuführen ist, hat sich bisher nicht entscheiden lassen.

Das anwendbare Verdichtungsverhältnis wurde durch das Auftreten von Zündungen begrenzt. In diesem Falle konnte mit $\xi = 7,5$ die vollständige Kurve gefahren werden, während bei $\xi = 8$ Knallen auftrat, sobald die Auslasstemperatur etwa 200°C überstieg, entsprechend einem Δt_{GL} von etwa 60°C . Bei zunehmenden Verdichtungsverhältnissen tritt

das Knallen dann sehr rasch auch schon bei ärmeren Mischungsverhältnissen und bei niedrigeren Auslasstemperaturen auf, wobei aber die allgemeine Kurvenform stets erhalten bleibt. Die Kurve $\xi = 8,5$ konnte deswegen nur bis zu einem Brennstoffverhältnis von etwa 1,0 gefahren werden. Auch das Wandern der Knallgrenze wiederholte sich bei allen anderen untersuchten Kraftstoffen.

Man erkennt aus den Kurven, dass das stöchiometrische Gemisch keine irgendwie bevorzugte Rolle spielt. Dies war zu erwarten, da es unter der Voraussetzung völliger Verbrennung definiert ist, während hier Sauerstoff stets, auch bei Gemischen, die reicher sind als das stöchiometrische, im Überschuss vorhanden ist. Man erkennt gleichzeitig, dass Versuche wie die von Peletier (10) mit konstant gehaltenem Mischungsverhältnis oder allein mit stöchiometrischem Gemisch die Zusammenhänge nur unvollkommen erkennen lassen.

Um anschaulich zu zeigen, wie sehr die Form der Kurven sich ändert, wenn man von einem Mischungsverhältnis zu einem anderen übergeht, wurde Abb. 5 zur Abb. 7 umgezeichnet. Diese Darstellung zeigt besonders, dass Einzelergebnisse bei einem bestimmten Mischungsverhältnis nur mit grösster Vorsicht verallgemeinert werden dürfen, ja nicht einmal dem untersuchten Stoff eigentümlich sein können. Dagegen gilt das wahrscheinlich weniger für Selbstzündungsversuche, wie sie Jost und Teichmann (16, 17) durchgeführt haben.

Die Versuche mit anderen Brennstoffen ergeben, dass auf die Lage des Maximums auch der Kraftstoff von entscheidendem Einfluss ist. Der bei Kraftstoff 3 (Abb. 5 u. 6) erst bei reichen Gemischen beobachtete Sprung der Kurven tritt bei Kraftstoff 10 (Abb. 13) bereits bei Brennstoffverhältnis $\beta = 1$ auf. Es ist interessant sich zu erinnern, dass bei Betrieb an laufendem Ottomotor überhaupt nur ein eng um das Brennstoffverhältnis 1,0 liegendes Gebiet verwirklicht wird. Wenn also ein Motor klopft, so handelt es sich um Selbstzündungen eines Gemisches, dessen Reaktionsbedingungen - im Sinne der Abb. 5 - rechts oder auch links von dem hier beobachteten Maximum liegen.

Ein Blick auf die mit weiteren Kraftstoffen gewonnenen Ergebnisse zeigt, dass, wie zu erwarten war, ein enger Zusammenhang zwischen den Vorreaktionen und der Oktanzahl besteht. Je höher die Oktanzahl, desto geringer die Vorreaktionen. Man könnte Kurven zeichnen, die für konstante Werte des Brennstoff- und des Verdichtungsverhältnisses die Temperaturdifferenz Δt_{GL} als Funktion der Oktanzahl darstellen. Für diese Kurven müssten aber Werte aus den Darstellungen $\Delta t_{GL} = f(\beta)$ entnommen werden, die bald links, bald rechts vom Maximum der Kurven bzw. der Unstetigkeitsstelle liegen, was wenig sinnvoll erscheint. Ausserdem überzeugt man sich rasch, dass trotz des allgemeinen Zusammenhanges manche Brennstoffe bei Berücksichtigung ihrer Oktanzahl verhältnismässig viel oder wenig Vorreaktionen ergeben und deshalb aus diesen Kurven stark herausfallen würden. Ein Beispiel hierfür sind die drei Kraftstoffe Nr. 3, 4, 5, die alle als Flugkraftstoff Oktanzahl 87 bezogen wurden. Zunächst wurden ausführliche Kurven mit Kraftstoff Nr. 3¹⁾ (Fliegerkraftstoff I) aufgenommen (Abb. 5, 6, 7). Als der Vorrat an Kraftstoff 3 verbraucht war, stellte sich heraus, dass nachgelieferter Kraftstoff der gleichen Bezeichnung (Fliegerkraftstoff B 4) eine geringere Oktanzahl haben müsse, da sich merklich höhere Vorreaktionen ergaben. Dieser neue Kraftstoff wurde für die weiteren Versuche mit Kraftstoff Nr. 4 (Fliegerkraftstoff II) bezeichnet und später von der IG Farbenindustrie A.G. im Klopffprüfmotor untersucht. Es ergab sich die über 87 liegende Oktanzahl 88,1. Leider war bei Beginn der Versuche verärgert worden, eine Probe des Kraftstoffes 3 zurückzuhalten, sodass dessen genaue Oktanzahl nicht bekannt ist. Die Versuche mit Kraftstoff 4 (Fliegerkraftstoff II) wurden in der Hoffnung, dass ein dritter wieder die Werte des Kraftstoffes 3 ergeben würde, abgebrochen. Ergebnisse liegen nicht vor. Der

1) Die Bezifferung der Kraftstoffe bezieht sich auf Zahlen-tafel 1. Die drei benutzten Fliegerkraftstoffe wurden ausserdem mit I, II, III in der Reihenfolge ihrer Verwendung bezeichnet.

nun gelieferte dritte Fliegerkraftstoff, Kraftstoff 5 (Fliegerkraftstoff III auf Zahlentafel 1) zeigte weniger Vorreaktionen als Kraftstoff 3 (Abb. 8)¹⁾. Die spätere Untersuchung im I.G. Klopffprüfmotor durch die I.G. Farbenindustrie A.G. ergab die verhältnismässig hohe Oktanzahl von 90,6, sodass das sich einstellende geringere Mass der Vorreaktionen verständlich ist. Wie ein Vergleich der Abb. 5 und 8 zeigt, ist aber der Unterschied für eine Oktanzahldifferenz von wahrscheinlich nicht mehr als 1 (die Oktanzahl des Kraftstoffes Nr. 3 muss nach den Vorreaktionen zwischen 88,1 und 90,6, den Oktanzahlen der Kraftstoffe Nr. 4 und 5 liegen) recht beträchtlich, vor allem im Vergleich mit den Kraftstoffen 1 (OZ 58) (Abb. 11) und 2 (OZ 74) (Abb. 12). Wie auch schon die verschiedenartige Gestalt der Kurven vermuten lässt, wird also der allgemeine Zusammenhang: hohe Oktanzahl - kleine Vorreaktionen durch besondere Eigentümlichkeiten des einzelnen Kraftstoffes stark überlagert. Im allgemeinen gilt dieses Gesetz aber, auch zwischen verbleiten und unverbleiten Kraftstoffen (Kraftstoff 2 und 13 (Abb. 12)). Von Ausnahmen wird noch zu sprechen sein.

3) Besprechung der allgemeinen Kurvenform.

Zur Deutung der gewonnenen Kurven kann nicht viel gesagt werden. Erst recht erscheint ein Versuch der Vorausberechnung oder der Vorhersage vorläufig völlig aussichtslos. Man muss sich darauf beschränken, allgemeine Zusammenhänge aufzudecken und Beziehungen zu Ergebnissen früherer Forschungsarbeiten zu finden.

Zu erwarten war das Ansteigen der Kurven mit wachsendem Brennstoffverhältnis. Es ist auch klar, dass das stöchiometri-

1) Die Abb. 8 enthält gestrichelt das Ergebnis eines Versuches mit Beigabe von Sauerstoff. Hierüber s. S. 40. Die an die Kurven der Abb. 8 geschriebenen Zahlen bedeuten °C. Hierzu s. den nächsten Abschnitt.

sche Mischungsverhältnis in den Kurven nicht besonders hervortreten kann, da, solange nur Vorreaktionen ablaufen, Sauerstoff stets reichlich im Überschuss vorhanden ist.

Bemerkenswert ist dagegen der negative Temperaturkoeffizient, wie ihn besonders Abb. 7 ($\Delta t_{GL} = f(\epsilon)$) zeigt. Die meisten Kurven fallen nach Überschreiten ihres Maximums mit wachsendem ϵ , d.h. also doch mit wachsender Höchsttemperatur, der die Gemische ausgesetzt wurden, ab. Diese Erscheinung ist allen untersuchten Kraftstoffen eigen, wenn auch bei kleinerer Oktanzahl in geringerem Masse. (Vergl. Abb. 11). Aber bei der Oxydation von Kohlenwasserstoffen, bei der zweifelsfrei Kettenreaktionen eine bedeutende Rolle spielen, wäre es schon bemerkenswert, wenn die Reaktion temperaturunabhängig sein sollte.

Negative Temperaturkoeffizienten sind bei der Oxydation von Kohlenwasserstoffen auch sonst schon gefunden worden (vergl. z.B. Jost (4) S. 362, 422, 430 ff.).

Auch bei den Versuchen der Abb. 9 mit geänderter Gemischeintrittstemperatur liegen die Kurven höherer Gemischeintrittstemperatur anfänglich unter den Kurven niedriger Eintrittstemperatur. Wenn im Gegensatz dazu bei Versuchen (Abb. 10), bei denen die Wirkung einer Änderung der Kühlmitteltemperatur untersucht wurde, diese Erscheinung nicht auftrat, so dürfte der Grund sein, dass das Gemisch, das mit 140°C eintritt, noch nach dem Verdichtungstakt Wärme vom Zylinder aufnimmt (bzw. an ihn abgibt), wobei keine Wirkung mehr auf die Vorreaktionen eintritt. Im übrigen liegen aber auch hier die ansteigenden Äste dieser Kurven immerhin nahe zusammen.

Vergegenwärtigt man sich den starken Einfluss der Temperatur auf die Vorreaktionen und die beträchtliche Änderung der erreichten Verdichtungsendtemperatur bei Änderung des Mischungsverhältnisses (Abb. 4), so scheint die Form der Kurven, vor allem der Abbruch bei wachsendem Brennstoffverhältnis, überwiegend ein Temperatureinfluss und weniger ein Einfluss des Mischungsverhältnisses zu sein. Entnimmt man einmal für eine Anzahl von Punkten der Abb. 5 die erreichte Verdichtungsendtemperatur den Kurven der

Abb.4, und trägt diese Temperaturen, wie in Abb.5 geschehen, in das Bild ein, so erkennt man, dass die Kurvenmaxima fast genau die gleiche Temperatur von etwa 385 bis 405°C haben. Auch die Temperaturen nach Abbruch der Vorreaktionen sind untereinander praktisch gleich und liegen bei etwa 380°C. Geht man auf einer Kurve $\xi = \text{const.}$ in das Gebiet ärmerer Mischungsverhältnisse, steigt die Temperatur natürlich an.

Die erreichten Verdichtungsendtemperaturen sind in gleicher Weise für einige andere Kraftstoffe in den Abbildungen 8, 11, 13, 14 angeschrieben. Es zeigt sich, dass die Temperaturen für die Maxima unabhängig vom Kraftstoff stets etwa 390 bis 400°C betragen, nach Abbruch der Vorreaktionen aber nur etwa 10 bis 20°C geringer sind. Das gilt auch für Abb.9. Hier werden die gleichen Endtemperaturen bei geänderter Einlasstemperatur erreicht. Lediglich Kraftstoff 10 (Abb.13) weicht von dieser Regel etwas ab. So gering dieser Temperaturabfall von 10 bis 20°C ist, so scheint doch die Abnahme der Verdichtungsendtemperatur bei Steigerung des Brennstoffanteils im Gemisch für die mehr oder weniger rasche Verminderung der Vorreaktionen verantwortlich zu sein. Es bleibt allerdings offen, warum diese Verminderung bei hohen Verdichtungsverhältnissen fast plötzlich ist und ferner gilt diese Überlegung nicht für die Erklärung der links vom Maximum liegenden Kurventeile.

Aus der Betrachtung der erreichten Verdichtungsendtemperaturen ergibt sich, dass die Maxima bei höheren Verdichtungsverhältnissen weiter rechts liegen müssen, da bei reichem Mischungsverhältnis die gleiche Temperatur erst bei höherem Verdichtungsverhältnis erreicht wird. Die Übereinstimmung der Maximatemperatur ist so gut, dass sich die Lage der Maxima vorhersagen liesse. Gleichzeitig ist es verständlich, dass die Höhe der Maxima mit β ansteigen muss, da bei reichem Mischungsverhältnis mehr Brennstoff für die Reaktionen zur Verfügung steht.

4) Versuche mit verschiedenen Kraftstoffen Einfluss von Bleitetraäthyl

Abb.11 zeigt die Ergebnisse mit Kraftstoff Nr. 1, einem handelsüblichen "Grund"-Benzin der Nennoktanzahl 58. Entsprechend der verhältnismässig kleinen Oktanzahl sind die Vorreaktionen ziemlich bedeutend. Beim Vergleich mit den Abb.5 und 8, denen Versuche mit Kraftstoffen der Oktanzahl etwa 87 zu Grunde liegen, ergibt sich folgende allgemeine, bisher bei allen Versuchen bestätigte Regel:

Je geringer die Oktanzahl ist, umso steiler und gleichzeitig umso geradliniger ist der ansteigende Ast der Kurven, und umso geringer ist die Unterschneidung der Kurven niederen durch solche höheren Verdichtungsverhältnisses.

Die Kurve für $\xi = 6,5$ (Abb.11) konnte wegen auftretender Selbstzündungen nicht zu Ende gefahren werden. Der letzte Punkt liegt bei $\beta = 1,25$. Das entspricht nach Abb.4 einer höchsten Verdichtungsendtemperatur t_v von 410°C . Bei dieser Temperatur also hat dieser Kraftstoff eine Induktionszeit von weniger als der Zeit einer achteil Kurbelumdrehung, da anzunehmen ist, dass Selbstzündung nur eintritt, solange sich der Kolben in der Nähe des oberen Totpunktes befindet und das Gemisch sich noch nicht infolge Ausdehnung abgekühlt hat. Da bei $n = 1800$ U/min eine halbe Umdrehung $0,0167$ Sekunden dauert (vgl. hierzu auch Abb.22), so ergibt sich die Induktionszeit, wenn man dafür etwa 45° Kurbelwinkel annimmt, zu etwa $0,0042$ s. Damit besteht grössenordnungsmässig Übereinstimmung mit Teichmann (17), der für n-Heptan bei $\xi = 6$ und einer absoluten Kompressionsendtemperatur von $677^\circ\text{K} = 404^\circ\text{C}$ ($\lambda = 0,8$, was etwa $\beta = 1,2$ entspricht) einen Zündverzug von $0,005$ sec fand. Nun ist allerdings n-Heptan, das definitionsgemäss die Oktanzahl 0 hat, reaktionsfreudiger als der Kraftstoff 1 mit der Oktanzahl 56,4. Man hätte also bei unseren Versuchen einen längeren Zündverzug erwarten sollen, aber dieser Unterschied kann damit erklärt werden, dass bei dem betrachteten Versuchspunkt die Zündungen im Zylinder ja noch nicht auftraten und dass die Festlegung der für den Zündverzug zur Verfügung stehenden

Zeit auf 45° Kurbelwinkel willkürlich ist.

Die Ergebnisse der Versuche mit Kraftstoff Nr. 2, einem handelsüblichen, unverbleiten Fliegerkraftstoff der Oktanzahl 74, aus dem durch Bleizusatz der Fliegerkraftstoff OZ 87 hergestellt wird, zeigt Abb. 12. In Übereinstimmung mit den bisher gezeigten Ergebnissen sind die Vorreaktionen geringer als auf Abb. 11, der ansteigende Ast ist weniger steil und die Unterschneidung ist etwas ausgeprägter. Die höchste Temperaturdifferenz Δt_{GL} erreichte den Wert von $75^\circ C$. Rechnet man ganz rund den Energieinhalt des Kraftstoffes zu 10 000 kcal/kg, die 15 kg Gemisch bei einer spez. Wärme von $0,25 \text{ kcal/kg}^\circ C$ auf rund $2650^\circ C$ erwärmen, so ist also die durch Vorreaktionen erreichte Temperaturerhöhung etwa 3,5 % des gesamten Energieinhaltes (eines stöchiometrischen Gemisches). Das Ausmass der Vorreaktionen ist also durchaus beträchtlich.

In die Abb. 12 ist das Ergebnis eines Versuches mit Kraftstoff Nr. 13 eingezeichnet, der aus Kraftstoff Nr. 2 durch Beimischen von $1,3 \text{ cm}^3$ je Liter Ethylfluid blau der Ethylgesellschaft hergestellt wurde. ($1,3 \text{ cm}^3$ Ethylfluid enthalten $0,85 \text{ cm}^3$ Bleitetraäthyl). Das ist, wie aus der Analyse der Kraftstoffe Nr. 2, 3, 4 hervorgeht, etwa die Zusatzmenge, mit der üblicherweise der Fliegerkraftstoff OZ 87 aus dem Kraftstoff OZ 74 hergestellt wird. Tatsächlich ergab die Untersuchung des so gewonnenen Kraftstoffes im I.G.-Klopfpf-motor eine Oktanzahl von 87,8, die sehr befriedigend in die Reihe der Oktanzahlen von Fliegerkraftstoffen mit der Nennoktanzahl 87 hineinpasst. Die Kurve für diesen Kraftstoff Nr. 13 müsste demnach übereinstimmen mit den Kurven der Kraftstoffe mit der Nennoktanzahl 87 für $\epsilon = 6,5$ auf Abb. 5 oder Abb. 8. Da Kraftstoff Nr. 3, wie auf Seite 29 bereits festgestellt, eine Oktanzahl hat, die zwischen der Oktanzahl der Kraftstoffe Nr. 4 und 5 liegt, d.h. zwischen 88,1 und 90,6 (also wenig mehr als Kraftstoff Nr. 13) und Kraftstoff Nr. 5 die Oktanzahl 90,6 hat (also wesentlich mehr als Kraftstoff Nr. 13), so müssten sich für Kraftstoff Nr. 13 etwas mehr Vorreaktionen ergeben als in Abb. 7 (Kraftstoff 3) und wesentlich mehr als in Abb. 9 (Kraftstoff 5). Dies ist tatsächlich

der Fall: Kraftstoff 13 erreicht bei $\xi = 6,5$ ein Δt_{GL} von 50°C , Kraftstoff 3: 42°C und Kraftstoff 5: 22°C . Die Wirkung der Oktanzahl auf die Vorreaktionen ist also bei ähnlichen Kraftstoffen (die sich in diesem Falle durch verschiedenen Bleigehalt, auch durch verschiedenen Aromatengehalt unterscheiden) recht bedeutend.

Der Vergleich der Kurve für Kraftstoff 13 auf Abb. 12 mit den Kurven für Kraftstoff Nr. 2 zeigt, dass das Blei offenbar keine besondere Wirkung auf die Kurvenform hat. Wenn die Vorreaktionen geringer werden, sodass die Kurve für $\xi = 6,5$, die ohne Blei wegen Selbstzündungen nicht ausgefahren werden konnte, jetzt ganz gemessen werden kann, so war das zu erwarten, auch dass der ansteigende Ast etwas flacher liegt. Das Maximum verschiebt sich dabei etwas nach rechts. Die Kurven für $\xi = 5,0$ zeigen, dass der Bleizusatz die Vorreaktionen etwa auf die Hälfte vermindert hat.

Vergleiche zwischen verbleitem und unverbleitem Kraftstoff wurden auch mit I.G. Eichbenzin unternommen, (Bezeichnung der I.G. "I.G. 7", Kraftstoff Nr. 10) das die Oktanzahl 44,6 hat. Das Ergebnis der Versuche zeigt Abb. 13. Der Anstieg der Kurve für reines Eichbenzin ist entsprechend der niedrigen Oktanzahl sehr steil und gestreckt. Schon bei $\xi = 5,0$ werden Temperaturdifferenzen von 66°C erreicht, sodass, da sich geringere Verdichtungsverhältnisse nicht einstellen lassen, keine weiteren Kurven gefahren werden konnten. Der Abbruch der Vorreaktionen ist, ohne dass das Maximum eine runde Kuppe zeigt, ausserordentlich plötzlich bei einem Brennstoffverhältnis noch unter 1,0, sodass ein Klopfprüfmotor, der wie üblich mit etwa stöchiometrischem Mischungsverhältnis gefahren wird, garnicht in dem Gebiet der auf diese Weise nachzuweisenden Vorreaktionen arbeitet.

Der Brennstoff Nr. 10 wurde sodann, um den Einfluss von Bleitetraäthyl zu untersuchen, mit $1,35 \text{ cm}^3$ Ethylfluid je Liter versetzt. Das Ergebnis der mit diesem Kraftstoff (Kraftstoff Nr. 12) durchgeführten Versuche ist in Abb. 13 eingezeichnet. Es zeigte sich überraschenderweise im Gegensatz zu den bisher gewonnenen Ergebnissen, dass das Blei of-

fenbar keine oder nur eine sehr geringe Wirkung hat. Während auf dem ansteigenden Ast fast keine Wirkung festzustellen ist, wird lediglich das Maximum etwas herabgedrückt. Um festzustellen, ob diese überraschende Wirkungslosigkeit etwa an dem verwendeten Ethylfluid lag, wurde der Kraftstoff Nr. 10 mit der entsprechenden ($1 \text{ cm}^3/1$) Menge reinem Bleitetraäthyl (Kraftstoff Nr. 11) versetzt. Die Messergebnisse (vgl. Abb. 13) unterscheiden sich aber kaum von denen mit Kraftstoff 12.

Nach einer Eichkurve der I.G. müsste Eichbenzin mit 1 cm^3 Bleitetraäthyl je Liter die Oktanzahl 74,5 haben. Um nachzuprüfen, ob durch die Bleibeimischung tatsächlich die Oktanzahl von etwa 74,5 erreicht wurde, wurden die durch Bleizusatz aus Eichbenzin gewonnenen Kraftstoffe im I.G.-Klopfprüfmotor von der I.G. selbst untersucht. Es ergaben sich Oktanzahlen von 73,1 und 73,2¹⁾, sodass also bewiesen ist, dass das zugesetzte Bleitetraäthyl bzw. Ethylfluid in Ordnung war. Da diese Bleiunempfindlichkeit des I.G.-Eichbenzins im Gegensatz zu anderen Kraftstoffen steht, muss man also eine Besonderheit gerade dieses Kraftstoffes, etwa gegeben durch den hohen Gehalt an Paraffinen dafür verantwortlich machen. Dabei ist aber I.G.-Eichbenzin für die Verhältnisse am Klopfprüfmotor hervorragend bleiempfindlich. So überraschend dieses Ergebnis ist, findet es doch eine Parallele in den Versuchen von Jost und Rögener (20), die bei Versuchen über die Selbstzündung keinen Einfluss des Bleies bei Mischung mit n-Heptan (paraffinisch) finden konnten. Da durch unsere Versuche (Abb. 12) bewiesen ist, dass die Wirkung des Bleies durchaus und in dem an sich zu erwartenden Masse bei Versuchen über Vorreaktionen und Selbstzündungen festgestellt werden kann, dürfte es sich hier um eine Besonderheit der Paraffine handeln, die sich im Motor (vielleicht bei höheren Temperaturen?) anders verhalten, als bei Versuchen, deren Bedingungen von denen des laufenden Motors abweichen. Übrigens ist n-Heptan

1) übrigens liegt die Kurve für Kraftstoff 12, dessen Oktanzahl nur um 0,1 höher ist, als die des Kraftstoffes Nr. 11, um den leicht feststellbaren Betrag von 4°C tiefer!

sehr gut bleiempfindlich im Sinne der Motor-Oktanahl.

Die Versuche mit handelsüblichen Kraftstoffen zeigten ziemlich übereinstimmende Ergebnisse. Trotzdem war zu erwarten, dass die einzelnen Bestandteile entsprechend ihrer verschiedenen chemischen Struktur unterschiedliches Verhalten zeigen würden. Um darüber Aufschluss zu erhalten, wurden Versuche mit reinem Iso-Oktan, Äthylalkohol und Benzol unternommen. Die Oktanzahlen dieser Stoffe sind recht hoch. Isooktan hat definitionsgemäss die Oktanzahl 100, Alkohol hat nach Schätzungen (vgl. Zahlentafel 1) die Oktanzahl 99,5, während die Oktanzahl von Benzol bei 108 liegen dürfte.

Es war nicht möglich, bei Benzol Vorreaktionen in der hier angewendeten Art zu messen. Steigerte man die Verdichtung, so zeigten sich niemals, auch nicht unter veränderten Versuchsbedingungen, Vorreaktionen. Wohl aber traten plötzlich übergangslos die ersten Zündungen auf und zwar bei 140°C Gemischeinlasstemperatur und einer Drehzahl von 1800 U/min etwa bei $\xi = 11$. Benzol zeigte damit ein ähnliches Verhalten wie die bereits genannten Kraftstoffe, soweit sie ohne erkennbare Vorreaktionen bei hohen Verdichtungsverhältnissen und entweder sehr kleinem oder sehr hohem Brennstoffverhältnis zündeten.

Dass Benzol keine Vorreaktionen ergibt, ist auch von anderer Seite bereits gefunden worden. Insbesondere ist bekannt, dass Benzol vor der Verbrennung keine Peroxyde entwickelt. (vgl. (21) bzw. (4) S. 530 u. S. 458, ferner (22), (24)).

Alkohol, der wegen seiner hohen Verdampfungswärme in Verbindung mit dem niedrigen Mischungsverhältnis einen ausserordentlichen Wärmebedarf hatte, weswegen eine Heizung von 2 kW zusätzlich eingebaut werden musste, verhielt sich ebenso wie Benzol. Es liessen sich vor der Selbstzündung keine Vorreaktionen messen. Dieses Verhalten des Alkohols ist indessen überraschend.

Die Ergebnisse der Versuche mit Iso-Oktan (Kraftstoff 7) sind auf Abb. 14 dargestellt. Beim Vergleich mit den bereits besprochenen Kurven fällt vor allem die starke Verlagerung

der Kurven in das Gebiet sehr reicher Mischungen auf. Hoch bei einem Gemisch, das dreieinhalb mal so reich ist, wie das stöchiometrische, lassen sich Temperaturerhöhungen von etwa 45°C messen. Entsprechend der hohen Oktanzahl sind die Verdichtungsverhältnisse hoch. Die Neigung des ansteigenden Astes ist gering und die Krümmung und Unterschneidung der Kurven ist ausgeprägt. Bemerkenswert sind auch die breiten Maxima. Zum Vergleich sind in Abb.14 die Versuchsergebnisse des Kraftstoffes Nr.6 eingetragen, eines Sonderkraftstoffes der Oktanzahl 100, dessen Aromatenanteil von 40 % aus Benzol bestehen dürfte. Die Kurve wurde mit $\xi = 9,0$ gefahren und ist also mit der Iso-Oktankurve zu vergleichen, die eine Temperaturdifferenz von 35°C erreicht. Da die beiden Stoffe gleiche Oktanzahl haben, müsste man gleiche Vorreaktionen erwarten. Dass dies nicht der Fall ist, dürfte auf den Anteil an Benzol zurückzuführen sein, das seine Eigenschaften offensichtlich auch in Mischung beibehält.

5) Abhängigkeit der Vorreaktionen von den Motorbetriebsbedingungen.

Weitere Versuche betrafen den Einfluss von Abweichungen von den für die bisherigen Versuche festgehaltenen Werten für die Ansaugtemperatur, Kühlmitteltemperatur, Drehzahl und die Drücke im Ansaugrohr auf die Vorreaktionen.

Abb.15 zeigt für Kraftstoff Nr.2 die Abhängigkeit von Ansaugdruck. Die Zahlen an den Kurven bedeuten mm Wassersäule Unterdruck bzw. Überdruck im Ansaugrohr. Wie man sieht, ist die Wirkung die gleiche, wie eine Verringerung bzw. Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses. Auch die Unterschneidung der Kurven tritt auf. Die Wirkung ist allerdings bei Überdruck nicht so hoch wie bei Unterdruck, was teilweise durch Beeinflussung der Spülung erklärt werden könnte. Im ganzen scheint aber doch eine Druckänderung durchaus wesentlichen Einfluss zu haben. Diese Beobachtung widerspricht allerdings teilweise den Ergebnissen von Teichmann (17), der einen nur gerin-

gen Einfluss eines Überdruckes von 1 atü bei Selbstzündungsversuchen mit n-Heptan fand.

Abb.10 zeigt den Einfluss der Kühlmitteltemperatur, d.h. den Einfluss der Zylinderwandtemperatur. Wie zu erwarten, steigen die Vorreaktionen mit wachsender Kühlmitteltemperatur. Gerade diese Kurven zeigen den starken Einfluss der gesamten Motortemperatur und machen die starke Abhängigkeit des Klopfens von Zylinder- und Kolbentemperatur verständlich.

Abb.16 zeigt den Einfluss der Drehzahl. Es ist zu erwarten, dass eine Verringerung der Drehzahl, d.h. eine Vergrößerung der für die Reaktionen zur Verfügung stehenden Zeit, grössere Temperaturdifferenzen ergibt. Überraschend ist aber das Ausmass des Einflusses. Eine Verringerung der Drehzahl um $1/6$ erhöhte die Temperaturdifferenzen bereits von 22 auf 38° , d.h. um mehr als $2/3$. Eine Kurve mit der um $1/3$ verringerten Drehzahl (1200 U/min statt 1800 U/min) liess sich bereits wegen auftretender Zündungen nicht mehr zu Ende fahren. Eine Erhöhung der Drehzahl wirkt dementsprechend stark hemmend. Interessant ist, dass auch hier gleichzeitig eine Verschiebung der Maxima eintritt, aber keine Unterschneidung der Kurven.

Die Wärmeverluste während des Verdichtungsaktes wirken den beobachteten Erscheinungen entgegen. Bei höherer Drehzahl wird weniger Wärme an den Zylinder abgegeben, die Ladung bleibt also wärmer. Wenn der Temperatureinfluss den Zeiteinfluss überwöge, müssten, umgekehrt als gemessen, die Kurven für höhere Drehzahl über den Kurven für niedere Drehzahl liegen.

Abb.17 veranschaulicht, in wie starkem Masse die Vorreaktionen von den Betriebsbedingungen des Motors im gesamten abhängen. Hier sind mit der Normalkurve für Brennstoff Nr.5 ($n = 1800$ U/min, $t_K = 140^{\circ}\text{C}$, $t_{Ge} = 140^{\circ}\text{C}$) Versuchsergebnisse mit gleichzeitiger Änderung von Drehzahl, Kühlmitteltemperatur und Gemischeinlasstemperatur verglichen. Geringe Änderungen haben ausserordentlich bedeutende Wirkung auf Vorreaktionen. Es ist also notwendig, das Gebiet, in dem man die Vorreaktionen messen kann, sorgfältig zu umgrenzen. Es bleibt nach den bisherigen Versuchen allerdings die Frage of-

fen, ob man die Reaktionen nicht in gleicher Weise bei wesentlich niedrigeren Temperaturen, aber dafür erhöhten Verdichtungsverhältnissen messen kann.

Abb. 9 zeigt den Einfluss der Gemischeintrittstemperatur für Kraftstoff Nr. 5. Wie an sich zu erwarten, ist der Einfluss recht bedeutend. Er wäre noch grösser, wenn nicht infolge der von der Zylinderwandtemperatur abweichenden Gemischeintrittstemperatur Wärme an den Zylinder flösse, also eine Angleichung stattfände. Scharf ist die einem negativen Temperaturkoeffizienten entsprechende Unterschneidung der Kurven. Auch hier zeigt sich wieder die Verschiebung der Maxima, die hier sicher gleiche Gründe hat, wie bei einer Erhöhung der Verdichtungsverhältnisse: d.h. gleiche Verdichtungsendtemperatur wird bei grösserer Temperaturerhöhung des Gemisches (verglichen mit den Normalwerten für t_{Ge} und ξ) bei reicheren Gemischen erzielt.

Mit Kraftstoff Nr. 5 wurde ein Versuch gemacht, der den Einfluss des Sauerstoffanteils des Gemisches zeigen sollte. Das Ergebnis ist in Abb. 8 eingetragen. (Gestrichelte Kurve). Ein erster Versuch wurde mit einer Erhöhung der Sauerstoffmenge der Atmosphäre auf das Doppelte, also auf insgesamt 46 Gewichtsprozent Sauerstoff durchgeführt. Hierbei traten so heftige Zündungen auf, dass die Sauerstoffzufuhr auf einen Zusatz von 14,5 Gew.-% gedrosselt werden musste. Der Gesamtsauerstoffgehalt des Gemisches (ohne Kraftstoffanteil) betrug also dann 37,6 Gew.-% O_2 . Das Maximum der gemessenen Kurve liegt bei $33^{\circ}C$, gegen $22^{\circ}C$ beim gleichen Verdichtungsverhältnis von 6,5. Die Erhöhung beträgt also 50 %, während die Sauerstoffzugabe $\frac{37,6-23,1}{23,1} \cdot 100 = 63 \%$ beträgt. Eine besondere Wirkung des Stickstoffes unmittelbar auf die Reaktionen scheint danach nicht vorzuliegen.

Dieser Versuch ist übrigens der einzige, bei dem eine Erhöhung des Maximums ohne gleichzeitige Verschiebung gefunden wurde. Das Brennstoffverhältnis β wurde dabei auf den wahren Sauerstoffanteil des Gemisches bezogen.

6) Indikatorgramme

Bei einigen Versuchen wurde der Verlauf der Vorreaktionen mit dem Indikator verfolgt. Als Druckgeber wurde ein Quarzdruckgeber Bauart Gohlke-LFA verwendet, der über einen Verstärker die Schleife eines Siemens-Schleifenszillographen steuerte. Eine Zeitmarke gab 500 Hz. Der obere Totpunkt wurde mit Hilfe eines Unterbrechers mit einer dritten Schleife in das Diagramm geschrieben. Die Auslenkung der Schleife geschah bei 30° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt.

Diagramme zeigen die Abb. 18 bis 21. Von diesen zeigen die Abb. 18 und 19 den unverbleiten Kraftstoff Nr. 2 (OZ 74) und zwar einmal bei $\xi = 5,5$ und 900 U/min (Abb. 18) und einmal bei $\xi = 6,5$ und 1800 U/min (Abb. 19). Ein unmittelbarer Einfluss der Drehzahl, d.h. der Zeit auf die Diagrammform lässt sich nicht erkennen. Es wäre denkbar gewesen, dass bei der geringen Drehzahl der sich in den Linien zeigende Buckel schärfer an den oberen Totpunkt herangerückt wäre.

In Abb. 18 ist in eine Kurve eine Senkrechte durch die Stelle des oberen Totpunktes gelegt. Diese Gerade müsste die Symmetrieachse der Kurve sein, wenn keine Reaktionen stattfinden. Der durchaus beträchtliche Umfang der Vorreaktionen lässt sich daran gut erkennen.

Das hervorstechendste Ergebnis der Diagramme ist die Erkenntnis, dass sich die einzelnen Arbeitsspiele des Motors in Bezug auf den Umfang der Vorreaktionen ausserordentlich unterscheiden. Im Durchschnitt finden sich höchstens bei jedem zweiten Arbeitstakt merkbliche Vorreaktionen. Abb. 19 zeigt mindestens 2 Kurven, bei denen offensichtlich überhaupt keine Vorreaktionen auftreten und eine, bei der sie anscheinend erst auf etwa halbem Kolbenhub auftreten.

Die Verschiedenheiten lassen sich verhältnismässig zwanglos aus der Annahme erklären, dass von Takt zu Takt verschiedene Mengen (die man sich wahrscheinlich überhaupt als recht klein vorzustellen hat) aktiver Teilchen mit dem Rest-

gas im Zylinder zurückbleiben. Diese beeinflussen und erzeugen dann mehr oder weniger die Reaktionen im nächsten Spiel. Interessant ist dabei, dass, wenn in einzelnen Fällen eine Temperaturerhöhung des Gemisches von 75°C gemessen wurde, diese Temperaturerhöhung demnach also nur annähernd der Hälfte aller Arbeitsspiele zu verdanken ist. Das bedeutet, dass die Arbeitsspiele, die wesentliche Vorreaktionen ergeben, isoliert sogar Temperaturerhöhungen von etwa 150°C liefern müssten, und auch das ohne Selbstzündungen!

Im allgemeinen zeigen die Abbildungen übereinstimmend, dass der Energieumsatz der Vorreaktionen sich unmittelbar an den oberen Totpunkt anschliesst, d.h. sehr kurz nach dem Augenblick beginnt, in dem die höchste beim Verdichtungstakt auftretende Temperatur erreicht wird. Auch diese Tatsache weist, was ja durch die Versuche insgesamt bestätigt wird, auf eine beträchtliche Temperaturabhängigkeit der Reaktionen hin. Da aber andererseits die Reaktionen durch Expansion abgestoppt werden können, ist der Energieumsatz nach Erreichen der wirksamen Temperatur keineswegs sogleich sehr gross. Verlängerung der Verweilzeit bei der wirksamen Temperatur ergibt aber sehr rasch Zündung. Mit Drehzahl und Verdichtungsverhältnis (d.h. Temperatur) hat man also die Reaktionen recht gut in der Hand und die Gefahr von Selbstzündungen während des Verdichtungstaktes scheint nicht zu bestehen. "Rückschläge" dieser Art sind während der ganzen Versuche auch nicht aufgetreten.

Abb. 20 zeigt Diagramme des Kraftstoffes Nr. 13, d.h. denselben Kraftstoff wie Abb. 18 und 19, aber versetzt mit Bleitetraäthyl. Bemerkenswerterweise sind die charakteristischen Buckel verschwunden. Die Kompressionslinie geht glatt in die Expansionslinie über.

In Übereinstimmung mit diesem Ergebnis zeigt auch das mit Kraftstoff Nr. 3 (verbleit) aufgenommene Diagramm Abb. 21 keine Buckel, obwohl 59°C Temperaturerhöhung gemessen wurden. Während bei bleifreien Kraftstoffen rechts vom oberen Totpunkt unaufhörlich eine kleine runde Spitze auf- und absinkt, wenn man das Mattscheibenbild betrachtete, war der Linien-

zug bei gebleiten Benzinen fast völlig ruhig. Nur die Expansionslinie bewegte sich etwas. Bei der unmittelbaren Beobachtung auf der Mattscheibe konnte dieser Unterschied zwischen bleilosen und bleihaltigen Benzinen einwandfrei immer wieder gefunden werden. Trotzdem lassen sich aber mit bleihaltigen Kraftstoffen bei entsprechenden Temperaturen und Verdichtungsverhältnissen völlig die gleichen Temperaturerhöhungen erzielen wie mit bleilosen. Auch beim Versuch, der Abb. 20 zugrunde liegt, wurde bei $\beta = 1,4$ ein $\Delta t_{GL} = 50^\circ\text{C}$ gemessen, also ein durchaus bedeutender Wert, der gut in die Kurve der Abb. 12 hineinpasst.

Diese eigenartige Wirkung des Bleies ist also lediglich mit dem Indikator feststellbar. Das sonstige Verhalten der bleihaltigen Benzine unterschied sich bei den entsprechenden Verdichtungsverhältnissen (die im ganzen höher liegen) vor allem bezüglich Temperaturerhöhung und Selbstzündungsverhalten in keiner Weise von dem ungebleiten Benzine.

Selbstverständlich müssen die Diagramme der gebleiten Benzine an sich eine Ausweitung der Expansionslinie zeigen. Das Gegenteil wäre unmöglich, da Gase bei gleichem Volumen nur bei Temperaturerhöhung einen grösseren Druck ausüben können. Leider reicht die Genauigkeit der Diagramme und auch die der Totpunktmarke nicht aus, um diese Ausweitung rechnerisch zu verfolgen.

Für Abb. 19 wurde mit $\beta = 1,60$, $\varepsilon = 6,5$ und den allgemein angewendeten Ventilsteuerzeiten (d.h. mit ε_w) der Druck- und der Temperaturverlauf ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste rechnerisch ermittelt. Das Ergebnis zeigt Abb. 22. Man erkennt hieraus, dass die Maximaltemperatur rasch erreicht wird und ziemlich schnell wieder absinkt. Jedenfalls bleibt die Höchsttemperatur mit einer Annäherung, wie sie für die Betrachtung chemischer Reaktionen notwendig ist, nur etwa auf 15° Kurbelwinkel oder bei einer Drehzahl von 1800 U/min, wie sie der Abb. 22 und dem daran angebrachten Zeitmasstab zu Grunde liegt, auf etwa $1,3 \cdot 10^{-3}$ Sekunden erhalten. Man kann annehmen, dass die Reaktionen, die etwa bereits vor Erreichen des oberen Totpunkts beginnen, zu vernachlässigen sind.

Abb.23 zeigt eine Umzeichnung des dritten Diagramms von rechts der Abb.19 in Druck-Kolbenweg-Darstellung. Es zeigt sich, dass die Druckzunahme durch die Vorreaktionen auch in dieser Darstellung durchaus wesentlich ist. Sie entspricht etwa dem Druck-Kolbenweg-Diagramm eines Motors, der mit sehr kleiner Last läuft. Besonders anschaulich zeigt diese Darstellung, dass die Druckzunahme keineswegs, etwa wie es bei einer ausgesprochenen Spätzündung im Motor der Fall zu sein pflegt, erst w e s e n t l i c h nach dem oberen Totpunkt einsetzt.

7) Messung des Drehmomentes

Diese Indikatordiagramme machen die Tatsache verständlich, dass beim Betrieb des Motors das Freiwerden merklicher Energie auch durch die Verminderung des Drehmomentes festgestellt werden konnte, das zum Antrieb des Motors notwendig ist. Bezeichnet ΔM_d das Differenzdrehmoment zwischen dem Betrieb mit reiner Luft und dem Drehmoment bei Gemischbetrieb, so kann man feststellen, dass diese Differenz im allgemeinen durchaus der beobachteten Temperaturdifferenz Δt_{GL} proportional war. Abb.24 zeigt das Differenzdrehmoment (in kg des am Hebelarm des Pendelmotors angehängten Gewichtes) für Verhältnisse der Abb.5. Für $\xi = 6,5$ ist die Ordinate auch im absoluten Drehmoment M_d geteilt. Diese Teilung gilt genau nur für die Kurve mit $\xi = 6,5$.

Beim Vergleich der Abbildungen 24 und 5 sieht man, dass die Darstellung des Differenzdrehmomentes im wesentlichen ein Spiegelbild der Temperaturdifferenzen ist. Insbesondere zeigt das Drehmoment an derselben Stelle ein Minimum, wo die Temperaturdifferenz ein Maximum hat. Auch hier ist zu sagen, dass Peletier (10), der eine derartige Drehmomentenkurve bei einem Verdichtungsverhältnis für einen Brennstoff gemessen hat, keineswegs ein allgemeingültiges Resultat gefunden hat.

8) Chemische Analyse, Leuchterscheinungen

Bei einem Versuch (Verwendung von Kraftstoff Nr.3) wurde ein Teil des Auslasses abgesaugt und in mit flüssiger Luft gekühlte Fallen geleitet. Die von G. Danköhler und W. Eggersglüss durchgeführte chemische Analyse des aufgefangenen Gemisches ergab je mol Kraftstoff (als n-Heptan gerechnet) etwa 0,141 mol Aldehyde, 0,024 mol Säuren, 0,05 mol Alkohole, 0,001 mol Peroxyde. An Kohlensäure wurden 0,045 mol, an Wasser 1,1 mol gefunden. Von den Aldehyden bestanden 0,084 mol aus Formaldehyd. Ein ausführlicher Bericht wird demnächst veröffentlicht.

Bei sämtlichen Versuchen war der scharfe, kennzeichnende Geruch der Auspuffgase bemerkenswert. Die Auspuffleitung bedeckte sich innen rasch mit einer braunen, ölartigen Schmiere, doch ist durch Kontrollversuche nachgewiesen, dass dies nicht einfache Ablagerungen von Schmieröl waren. Es wurde auch untersucht, ob das Schmieröl selbst einen direkten Einfluss auf die Vorreaktionen hat, da es denkbar wäre, dass das Öl eine grössere Reaktionsfreudigkeit als der Kraftstoff hat. Versuche, bei denen der Motor bald mit sehr wenig Öl, bald mit aussergewöhnlich viel Öl gefahren wurde, zeigten aber keinen Einfluss.

Leuchterscheinungen konnten durch das eingebaute Quarzfenster nur ein einziges Mal festgestellt werden.

Ein Sonderkraftstoff¹⁾, der als Zündbeschleuniger für Dieselmotoren verwendet wird, und eine Oktanzahl von weit unter Null hat, liess als einziger bei $\xi = 5,0$, Einlasstemperatur $t_{Ge} = 110^{\circ}\text{C}$ ²⁾ und sehr starken Vorreaktionen ein bläuliches Leuchten im Zylinder erkennen, wie es schon Peletier beobachtet hat (10). Gleichzeitig war der Auspuffgeruch bei diesem Kraftstoff so scharf riechend wie sonst nicht.

1) überwiegend paraffinisch mit langen, unverzweigten Ketten

2) also 30°C weniger als bei den sonstigen Versuchen

IV. Folgerungen aus den Motorversuchen

Die Versuche sollten einen Überblick geben über den Umfang der Vorreaktionen im Ottomotor, insbesondere über ihre Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und den Motorbetriebsbedingungen. Allerdings sind sie nicht vollständig. Es fehlen Versuche insbesondere bei niederen Ausgangstemperaturen und dafür höheren Verdichtungsverhältnissen sowie mit anderen Kraftstoffen. Zunächst scheint es fruchtbar zu sein, besonders auch Kraftstoffe von sehr niedriger Oktanzahl zu untersuchen, worauf das besondere Verhalten des Zündbeschleunigers hinweist.

Darüber hinaus dürfte es zweckmässig sein, besonderes Gewicht auf die Untersuchung chemisch reiner Stoffe zu legen, da nur damit wirklich einwandfreie Ergebnisse erzielt werden können. Die Isolierung der einzelnen Einflüsse von Aromaten, Olefinen, Paraffinen usw. dürfte jedenfalls nur auf diese Weise möglich sein.

Im ganzen gibt es noch eine Fülle von Möglichkeiten, die mit dem hier angewendeten Verfahren untersucht werden könnte. Nun werden aber besonders reine Stoffe oft sehr teuer sein und nicht in den Mengen zur Verfügung stehen, die bei dem hier angewendeten Versuchsmotor notwendig sein (etwa 20 l je Kurve, etwa 150 l für ein vollständiges Kurvenblatt). Es soll deswegen ein kleiner Motor besonders für solche Versuche gebaut werden.

Das Hauptgewicht weiterer Untersuchungen sollte vor allem auf chemischen Untersuchungen der Produkte reiner Stoffe liegen, wozu Versuche in der hier durchgeführten Art im Gegensatz zu Verbrennungsbomben besonders geeignet sind, da sich die Oxydationsprodukte anreichern lassen. Voraussetzung dürften aber genaue Analysenmethoden sein.

Ursprünglich bestand, wenn auch von vornherein in zweiter Linie, die Absicht, das Verfahren zur Bestimmung der Oktanzahlen von Kraftstoffen zu verwenden. Das Überraschende

Verhalten einzelner Kraftstoffe, anscheinend besonders der Aromaten und Paraffine erschwert das. Andererseits hat sich gezeigt, dass die Temperaturerhöhung des Gemisches infolge der Vorreaktionen im ganzen gesehen sehr stark von der Oktanzahl abhängt. Insbesondere trifft das auf Kraftstoffe mit sehr niedriger Oktanzahl zu, sowie für einzelne Bereiche, wie beispielsweise das Gebiet der handelsüblichen Fliegerkraftstoffe, wo sehr geringe Oktanzahlunterschiede sehr merklich andere Temperaturdifferenzen ergaben. Es ist deswegen nicht ausgeschlossen, dass das Verfahren doch einmal unter gewissen, noch festzustellenden Voraussetzungen unmittelbar zur Bestimmung der Oktanzahl verwendet werden kann. Es würde sich dann verglichen mit dem bisherigen Verfahren am Klopfprüfmotor der Vorteil ergeben, dass der Springstiftindikator, der stets eine Quelle der Unsicherheit ist, vermieden wird und die Oktanzahl gewissermassen direkt mit dem Thermometer gemessen werden kann. Soweit störende Einflüsse vermieden wären, könnte die Genauigkeit hervorragend sein.

V. Zusammenfassung

=====

Es wird ein Verfahren zur Untersuchung der Vorreaktionen im Ottomotor beschrieben, bei dem Kraftstoff-Luftgemisch durch einen fremd angetriebenen Motor gesaugt wird. Infolge von Reaktionen im Verbrennungsraum, die ohne Entzündung vor sich gehen, entsteht eine Temperatursteigerung des Gemisches, die neben anderen Wirkungen gemessen wird. Diese Temperatursteigerung ist stark abhängig vom Mischungsverhältnis, von der Kraftstoffart, - insbesondere von deren Oktanzahl- sowie von den Betriebsbedingungen, insbesondere den Temperaturverhältnissen. Die Ergebnisse werden in Kurvenblättern dargestellt. Die mögliche Weiterentwicklung des Prüfverfahrens wird untersucht.

VI. Schrifttumsverzeichnis

=====

- 1) "Physikalische und chemische Vorgänge bei der Verbrennung im Motor", Vorträge 5. öff. Sitzg. Dtsch. Akad. Luftf. Forschg. 10./11. Mai 1939.- Schr. Dtsch. Akad. Luftf. Forschg. H. 9
- 2) Schmidt, E.: "Über das Klopfen und die damit verbundene Verminderung des Wirkungsgrades von Ottomotoren", Schr. Dtsch. Akad. Luftf. Forschg. H. 9, S. 215/230
- 3) Eucken, Arnold: "Grundsätzliches über den Zerfallmechanismus einfacher Kohlenwasserstoffe", Schr. Dtsch. Akad. Luftf. Forschg. H. 9, S. 93/112
- 4) Jost, Wilhelm: "Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen", Berlin, Springer, 1939
- 5) Egerton, C.G.: "Das Klopfen und die Kohlenwasserstoffverbrennung", Schr. Akad. Luftf. Forschg. H. 9, S. 173/182
- 6) Boyd, T.A.: "Untersuchungen über die Flamme im Motor", Autom. techn. Z. Bd. 43 (1940) H. 3 (deutsch) S. 51/62
- 7) Egerton, C.G. * Smith u. Ubbelohde. Phil. Trans. Roy. Lond. A 234. 433. (1935)
- 8) Withrow u. Rassweiler. Ind. Engin. Chem. 25. 1359 (1933), 26. 1256 (1934) 27. 872 (1935) (Ind. Edit.)
- 9) Broeze, I.I., van Driel, H. u. Peletier, L.A.: "Betrachtungen über den Klopfvorgang im Ottomotor", Schr. Dtsch. Akad. Luftf. Forschg. H. 9, S. 187/208
- 10) Peletier, L.A., van Hoogstraten, S.G., Smittenberg, I., Kooyman, P.L.: "Reactions chimiques préalables dans un moteur à essence", Chal. et Ind. 20 (1939) S. 120
- 11) Müller, K.O.: "Stand der experimentellen und wissenschaftlichen Kenntnisse der Oxydation von Kohlenwasserstoffen und des Phänomens des Klopfens in den Verbrennungsmotoren", Autom. techn. Z. 35 (1932) S. 597
- 12) Mondain-Monval, C.R. Akad. Sci. 189, 1195 (1929) und 191, 299 (1930)

- 13) Ernst, H.: "Über die Prüfung von Dieselkraftstoffen", Autom. techn. Z. 42 (1939) Nr. 8, S. 213/21
- 14) Schmidt, P.: "PKFS-Kraftstoff-Versuchsanlage", Neue Kraftf.-Ztg. 13 (1938) H. 4, S. 79/80
- 15) Mühlner, E.: "Luftverhältnis, Brennstoffverhältnis, Verdichtungs-zahl", Autom. techn. Z. 44 (1941) H. 3, S. 52/53
- 16) Jost, Wilhelm: "Reaktionskinetische Untersuchungen zum Klopfvorgang", Elektrochem. 47 (1941) Nr. 3, S. 262
- 17) Teichmann, H.: "Reaktionskinetische Untersuchungen zum Klopfvorgang II", Z. Elektrochem. 47 (1941) Nr. 4, S. 297
- 18) Danköhler, G.: "Gasbewegung in einem geschlossenen Verbrennungsraum bei einseitiger Zündung", Jb. dtsh. Luftf. Forschg. 1938, Bd. II, S. 62
- 19) Jost, W. und v. Müffling: "Reaktionskinetische Betrachtungen zum Klopfvorgang im Motor", Z. Elektrochem. 45 (1939) Nr. 1, S. 93
- 20) Jost u. Rögener: "Reaktionskinetische Untersuchungen zum Klopfvorgang III", Z. Elektrochem. 47 (1941) Nr. 4, S. 307
- 21) Egerton, Smith u. Ubbelohde. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Bd. 234 (1935) S. 433/521
- 22) Ubbelohde, A. R. Drinkwater, A. Egerton. Proc. Roy. Soc. Lond. A. Bd. 153 (1936) S. 103
- 23) Jost, W.: "Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Verbrennung im Motor", in "Motor und Kraftstoff", VDI-Verlag, Berlin 1939, S. 50/58
- 24) Pye: "Die Brennkraftmaschinen", Berlin, Springer, 1933

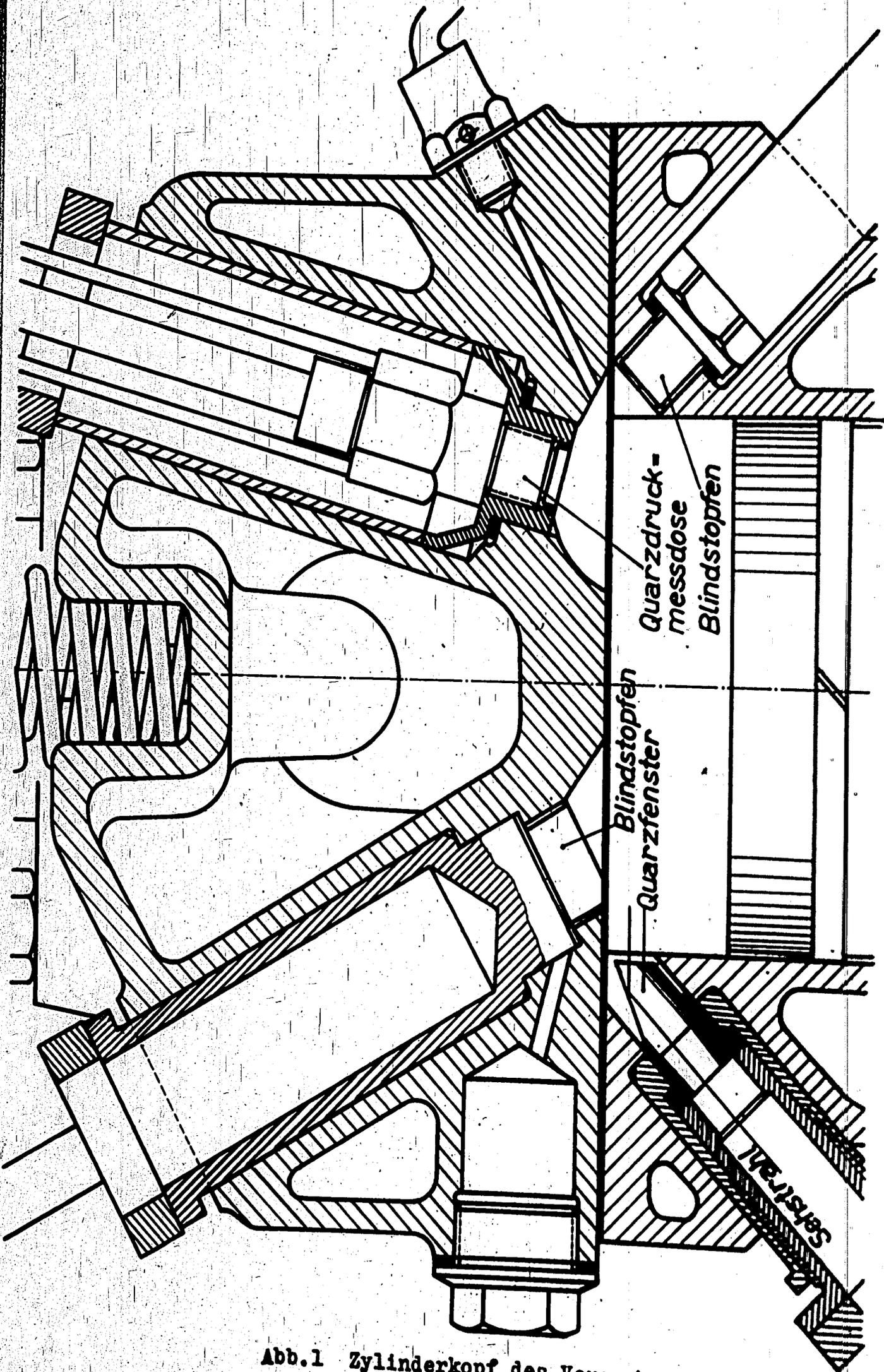


Abb.1 Zylinderkopf des Versuchsmotors

6390

Versuchsanordnung

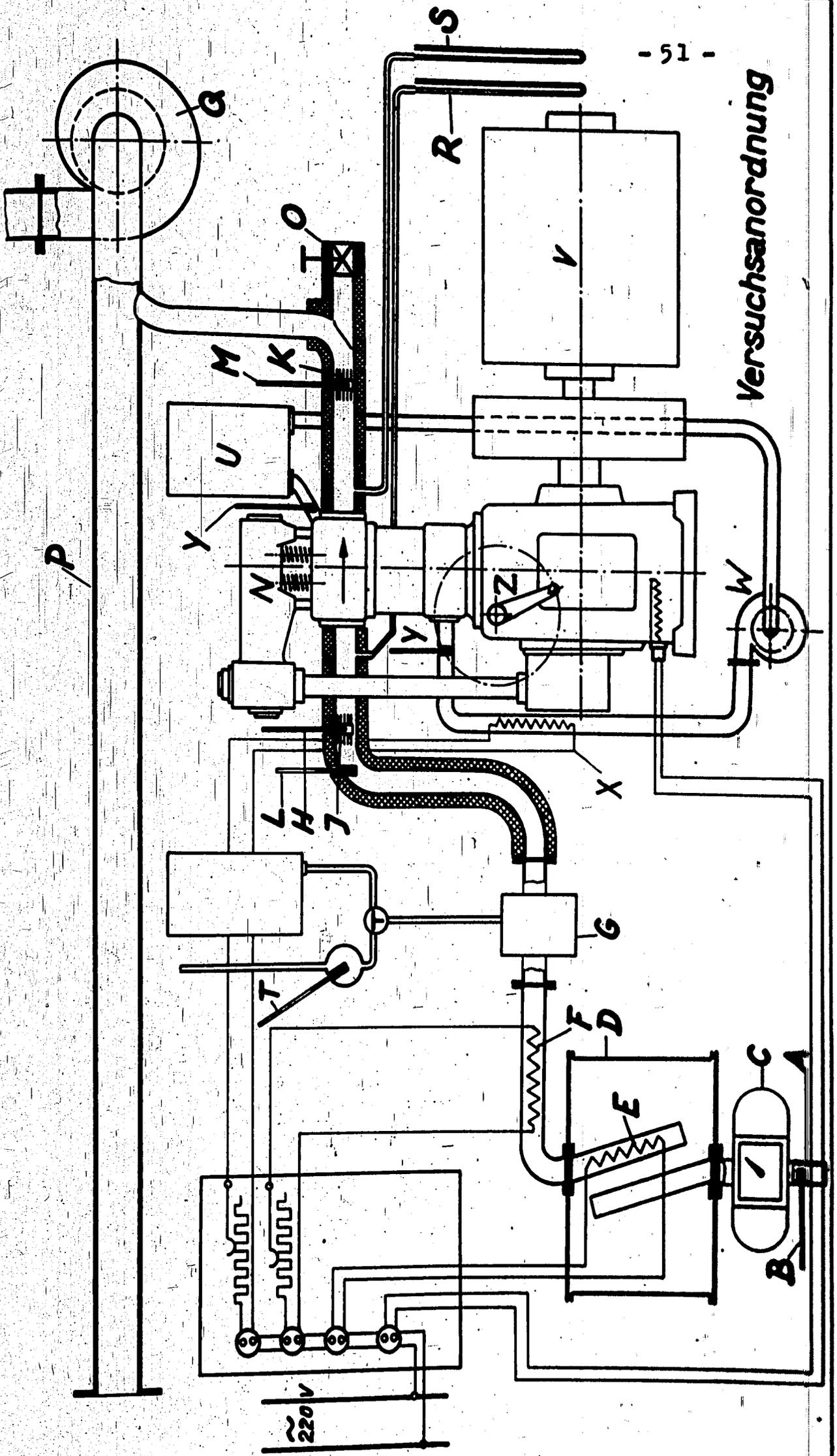


Abb.2 Die Versuchsanlage
Erläuterung s. Text.

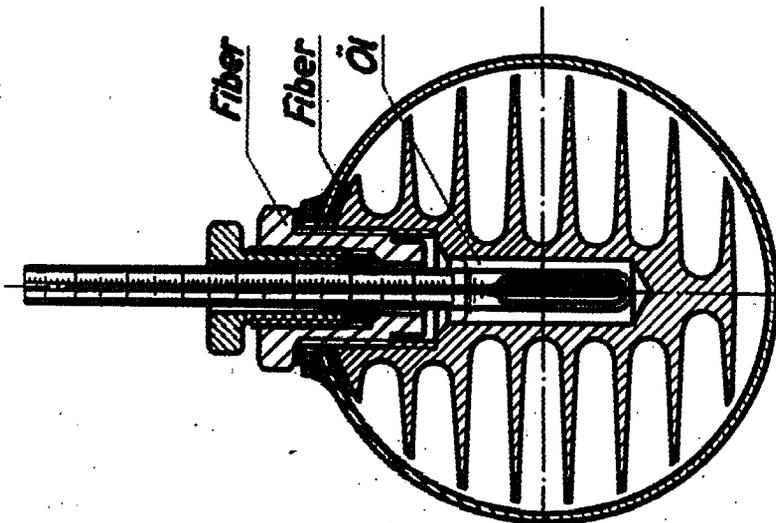
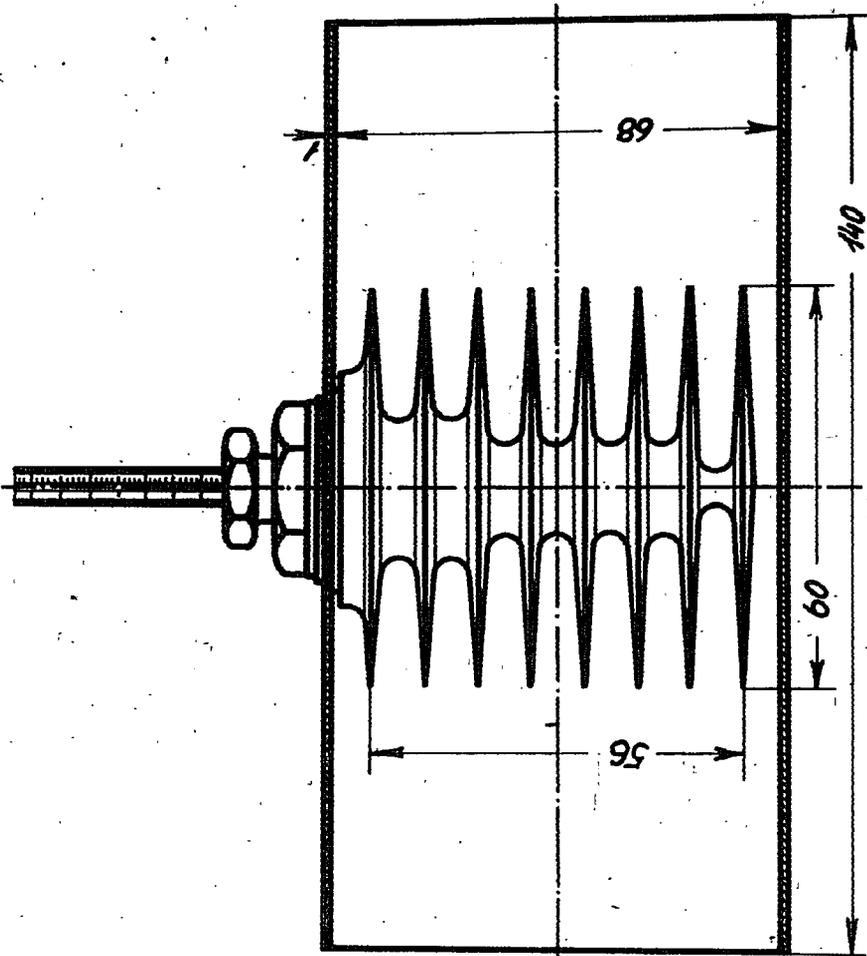


Abb.3 Rippenfühler für Quecksilberthermometer

6392

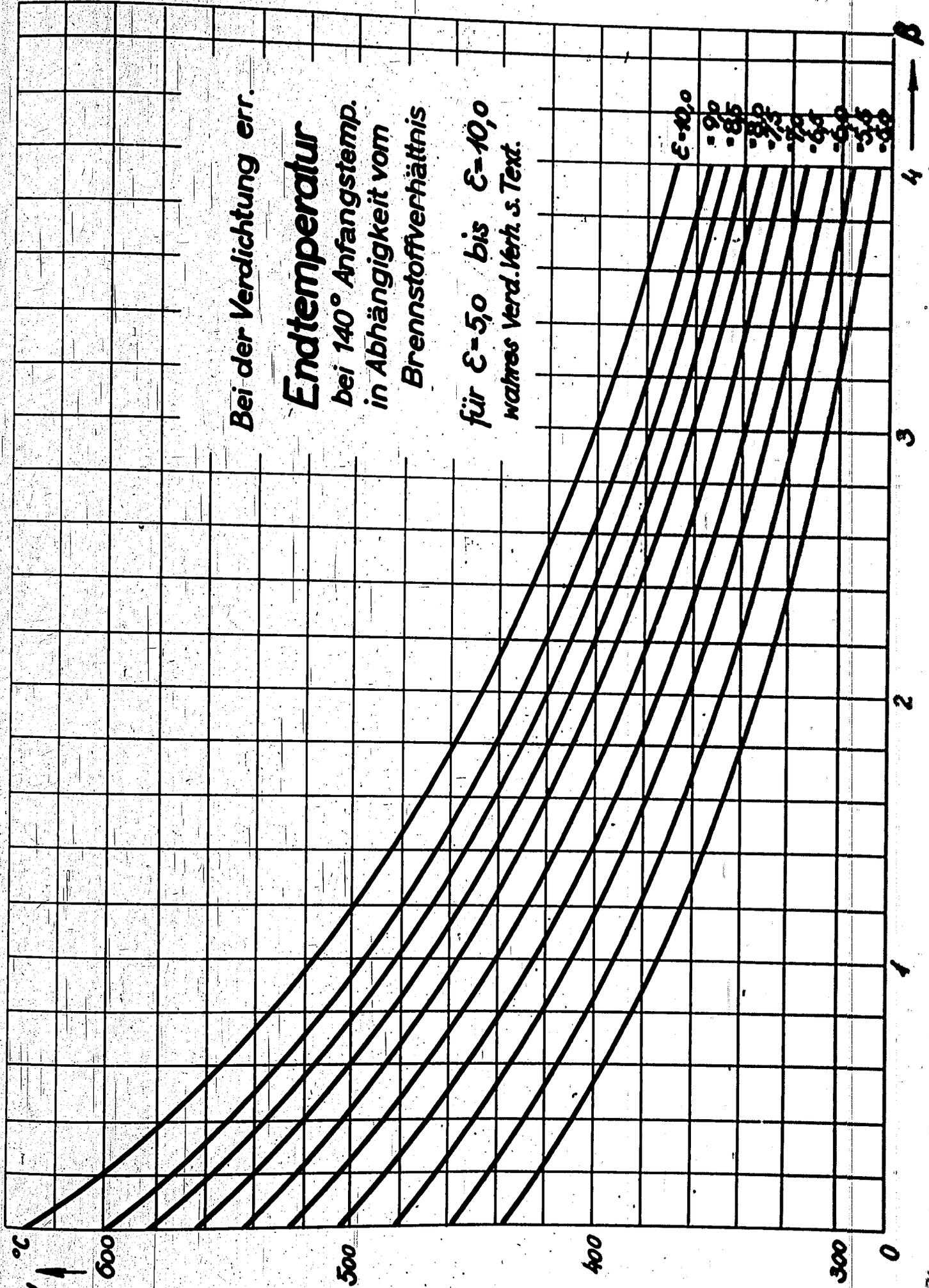


Abb.4 Verdichtungsendtemperatur

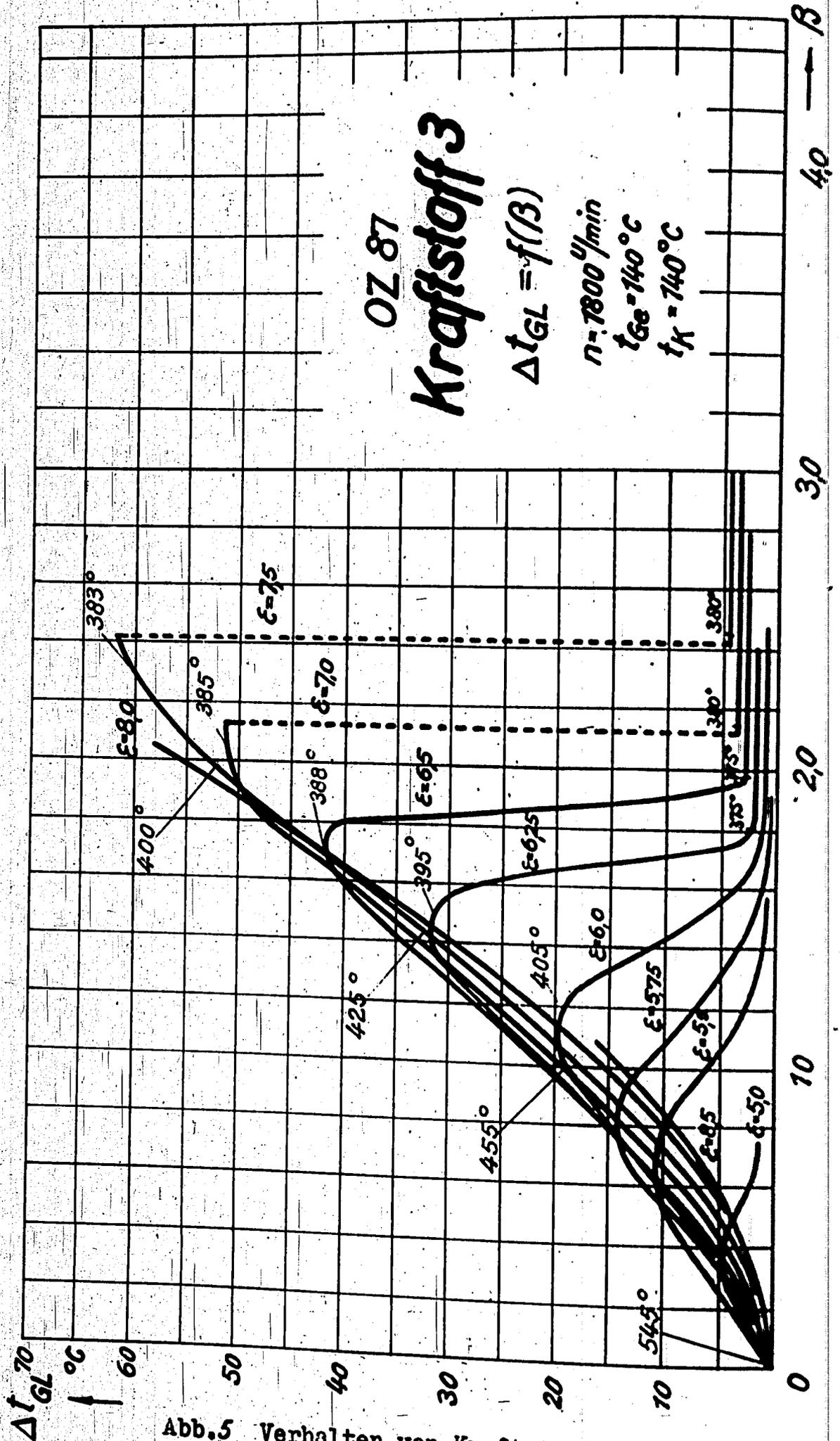


Abb. 5 Verhalten von Kraftstoff 3
(Fliegerbenzin Nenn-OZ 87)

Die Kurven sind der Deutlichkeit halber durch paralleles Verschieben nach oben auseinander gerückt; in Wirklichkeit beginnen sie alle im Koordinatenursprung.

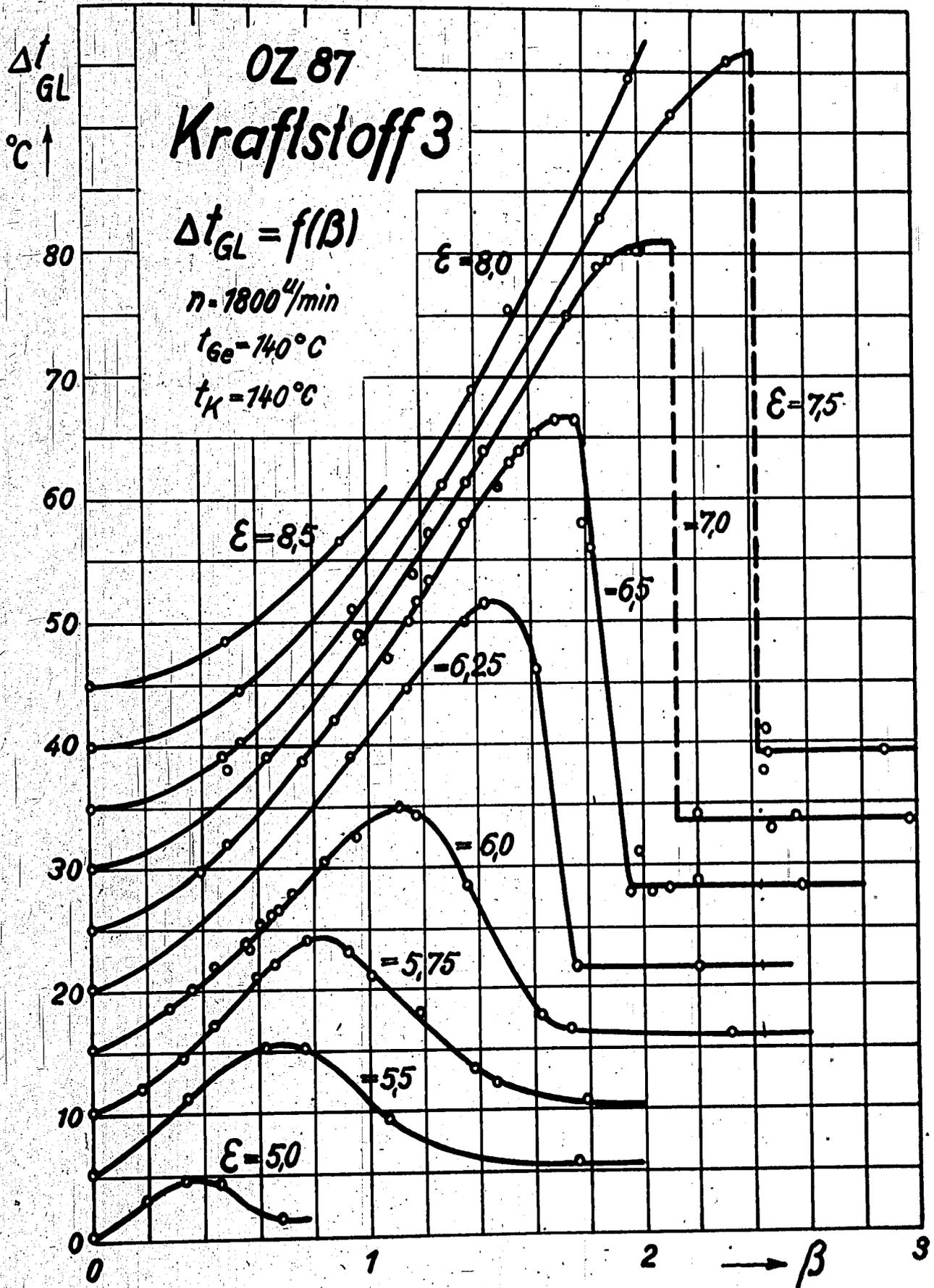


Abb. 6 Verhalten von Kraftstoff 3
Auseinandergezogene Darstellung

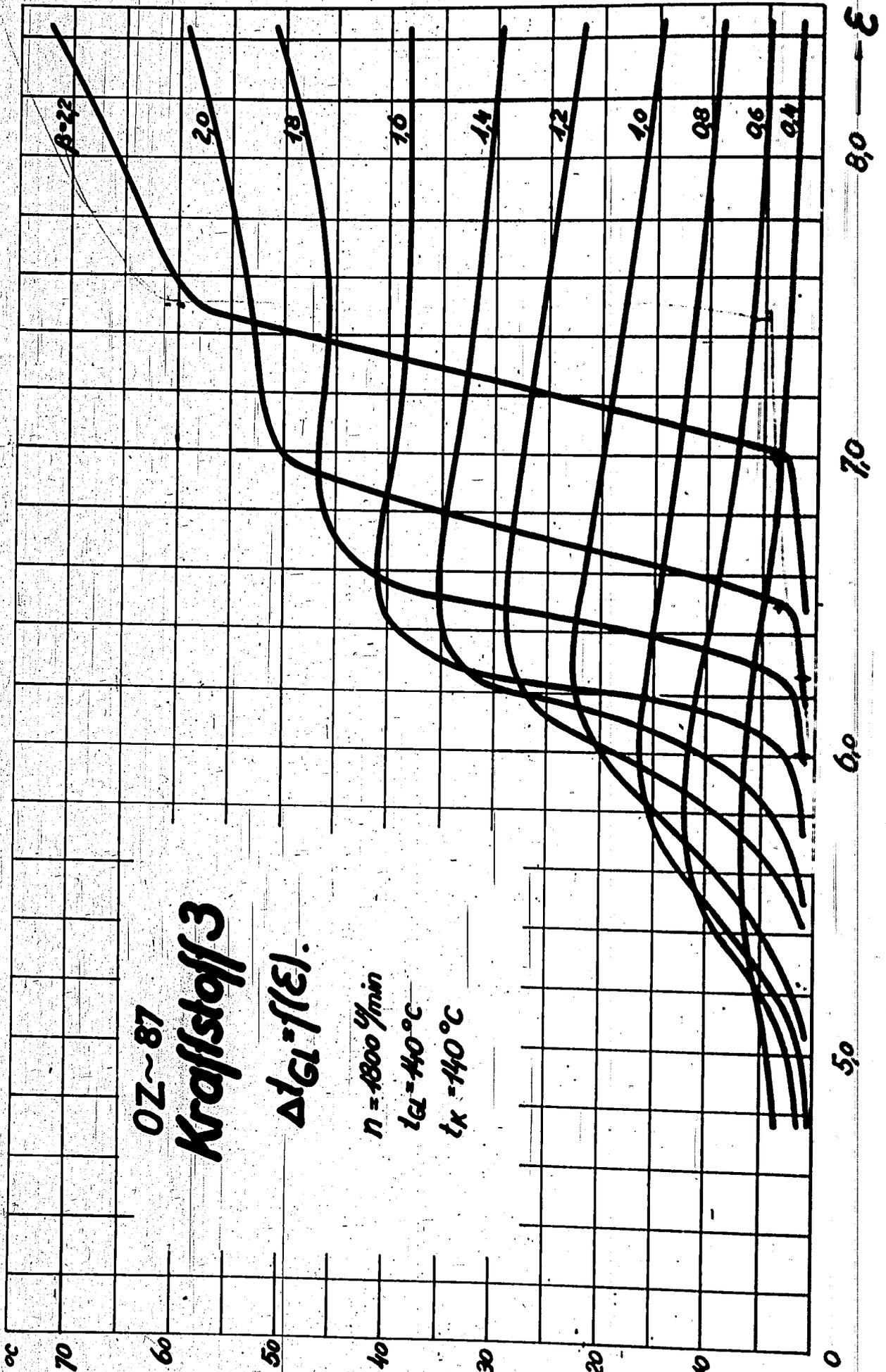


Abb. 7 Verhalten von Kraftstoff 3
 Umzeichnung von Abb. 5

6396

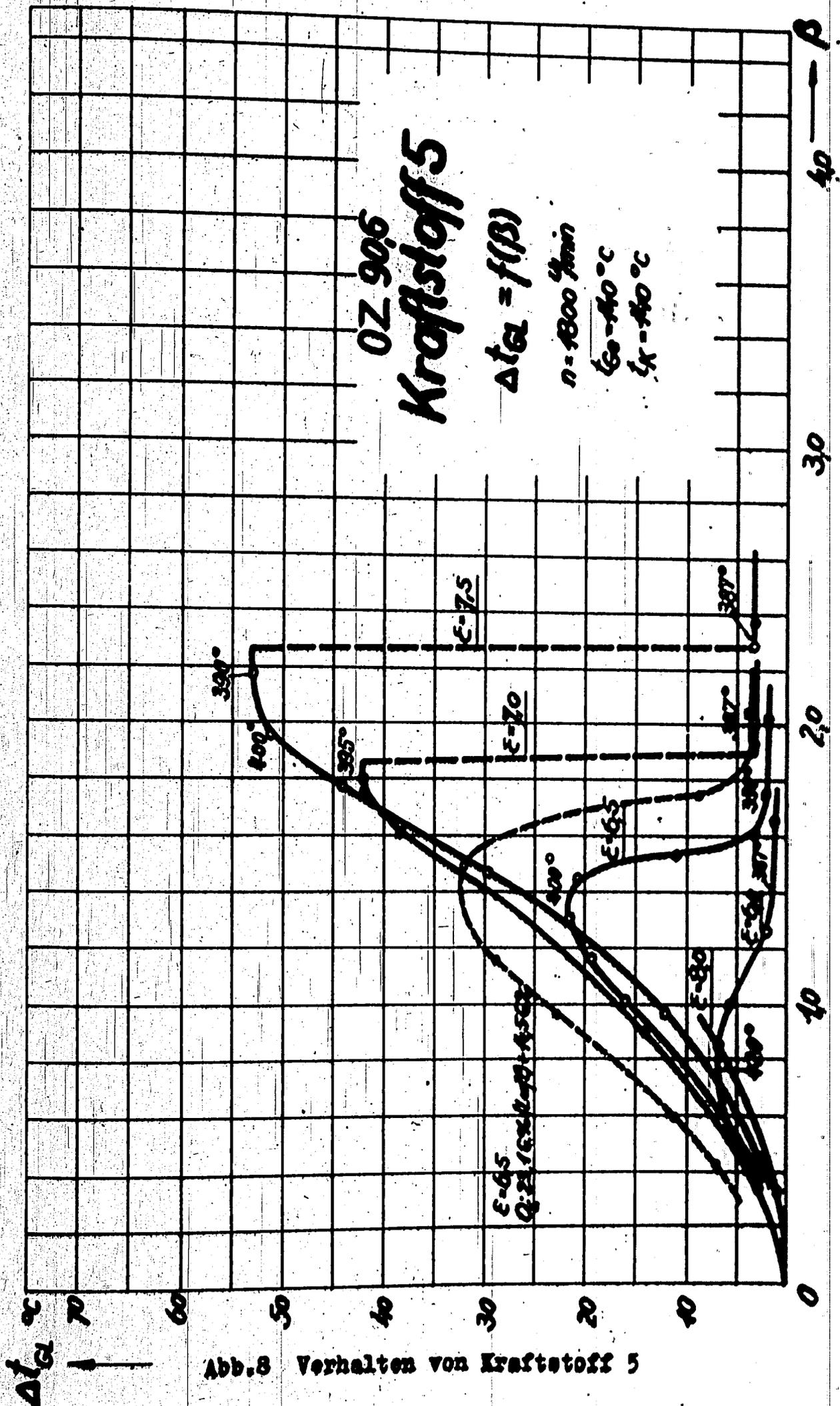


Abb. 8 Verhalten von Kraftstoff 5

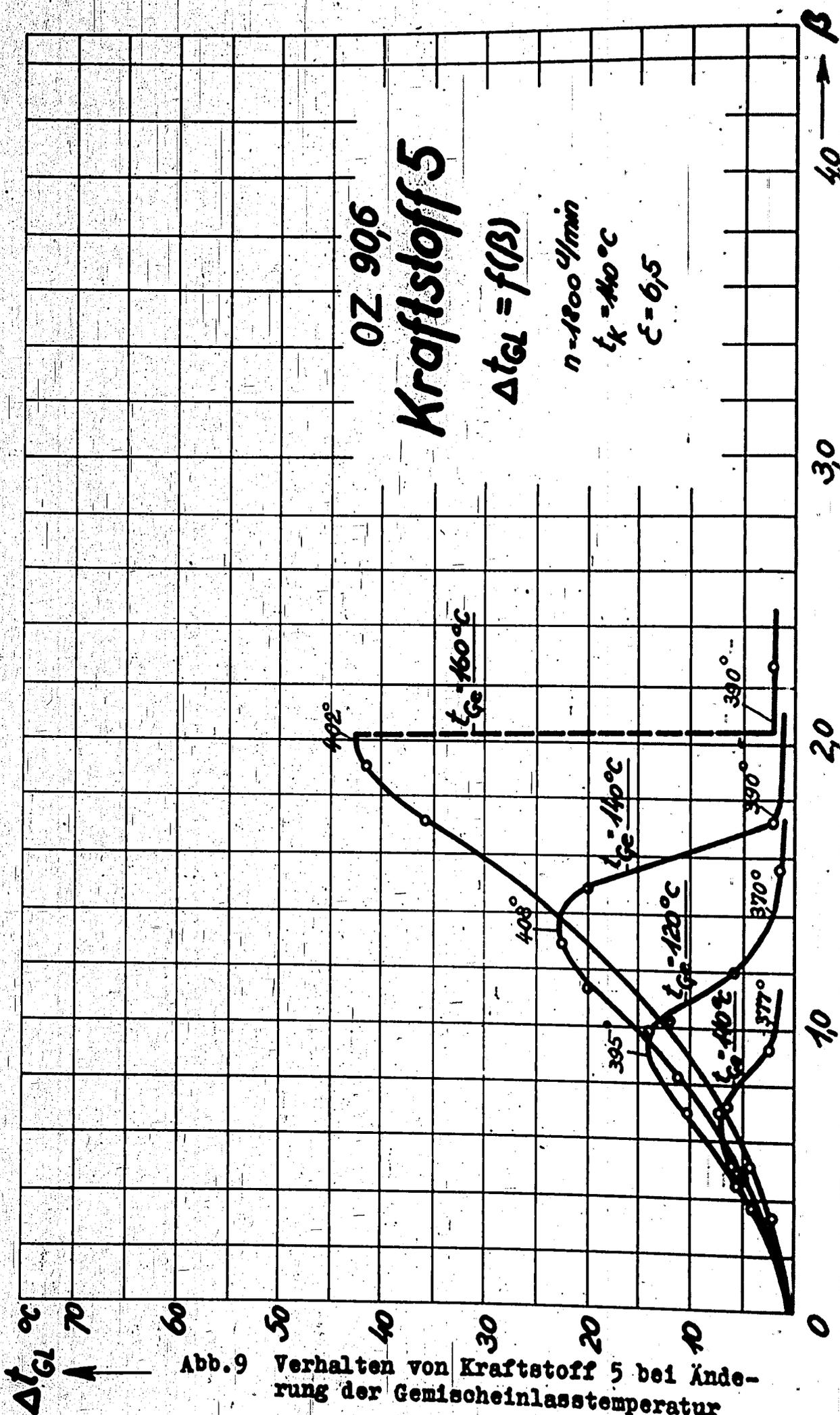


Abb. 9 Verhalten von Kraftstoff 5 bei Änderung der Gemischeinlasstemperatur

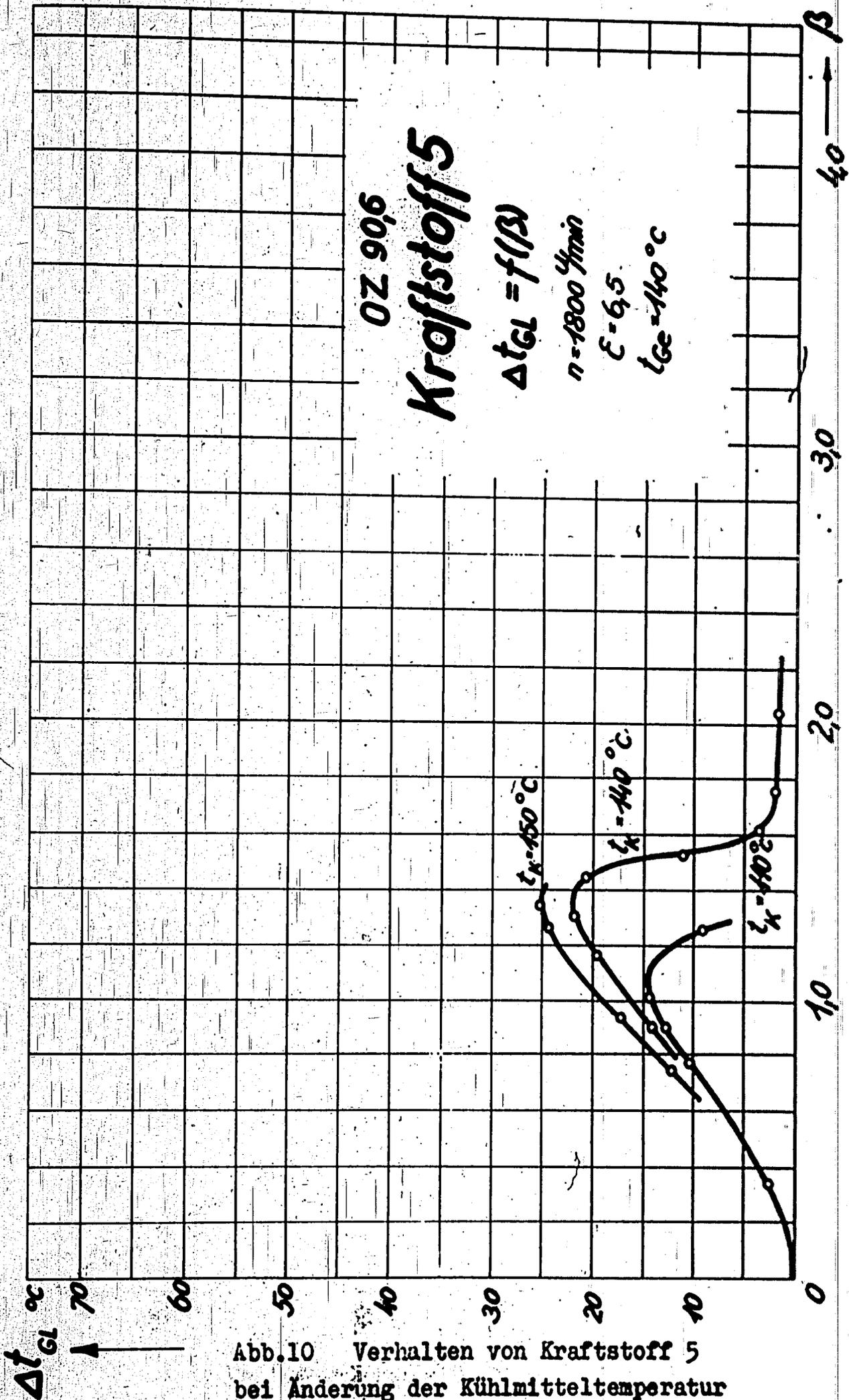


Abb.10 Verhalten von Kraftstoff 5 bei Änderung der Kühlmitteltemperatur

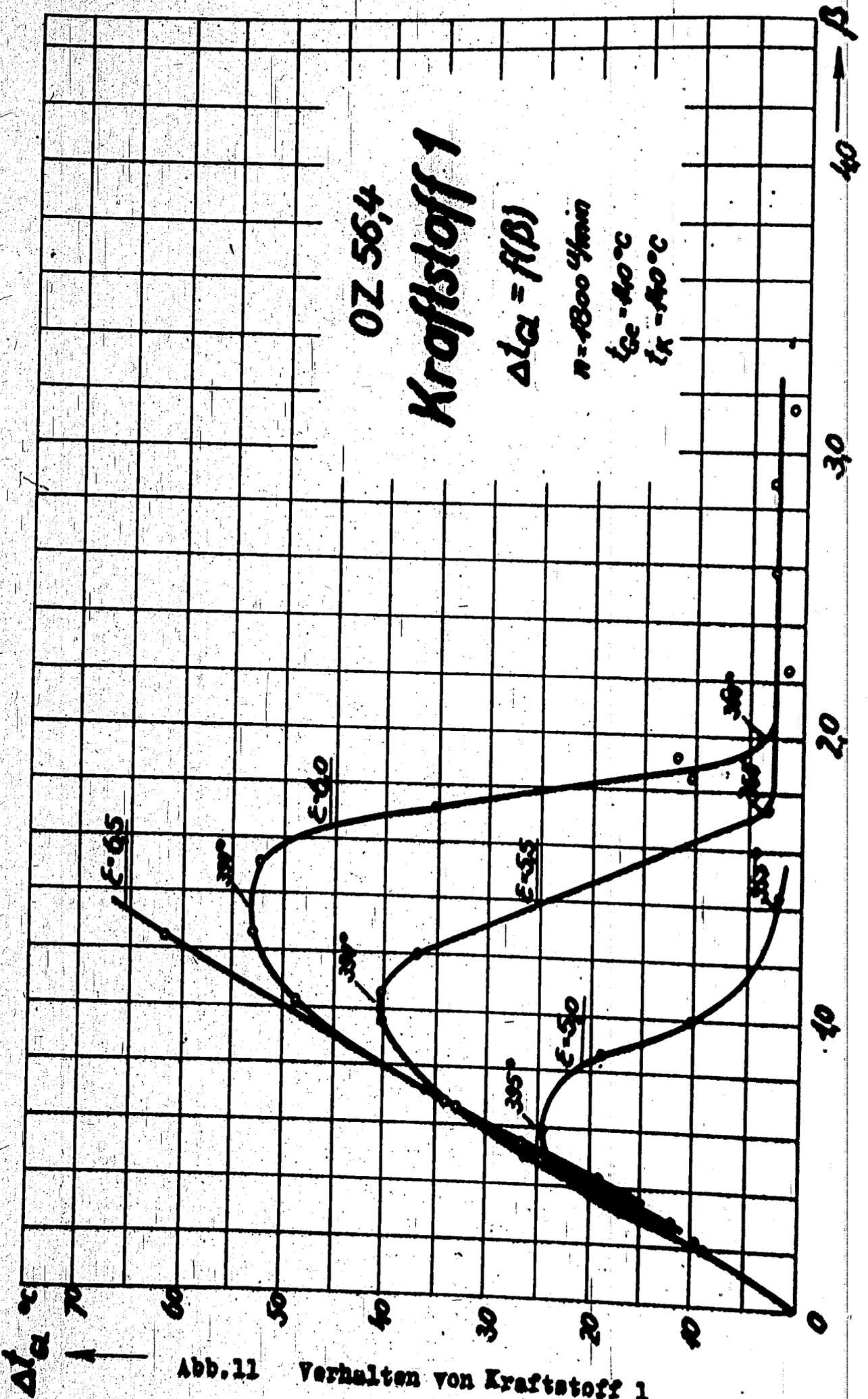


Abb. 11 Verhalten von Kraftstoff 1

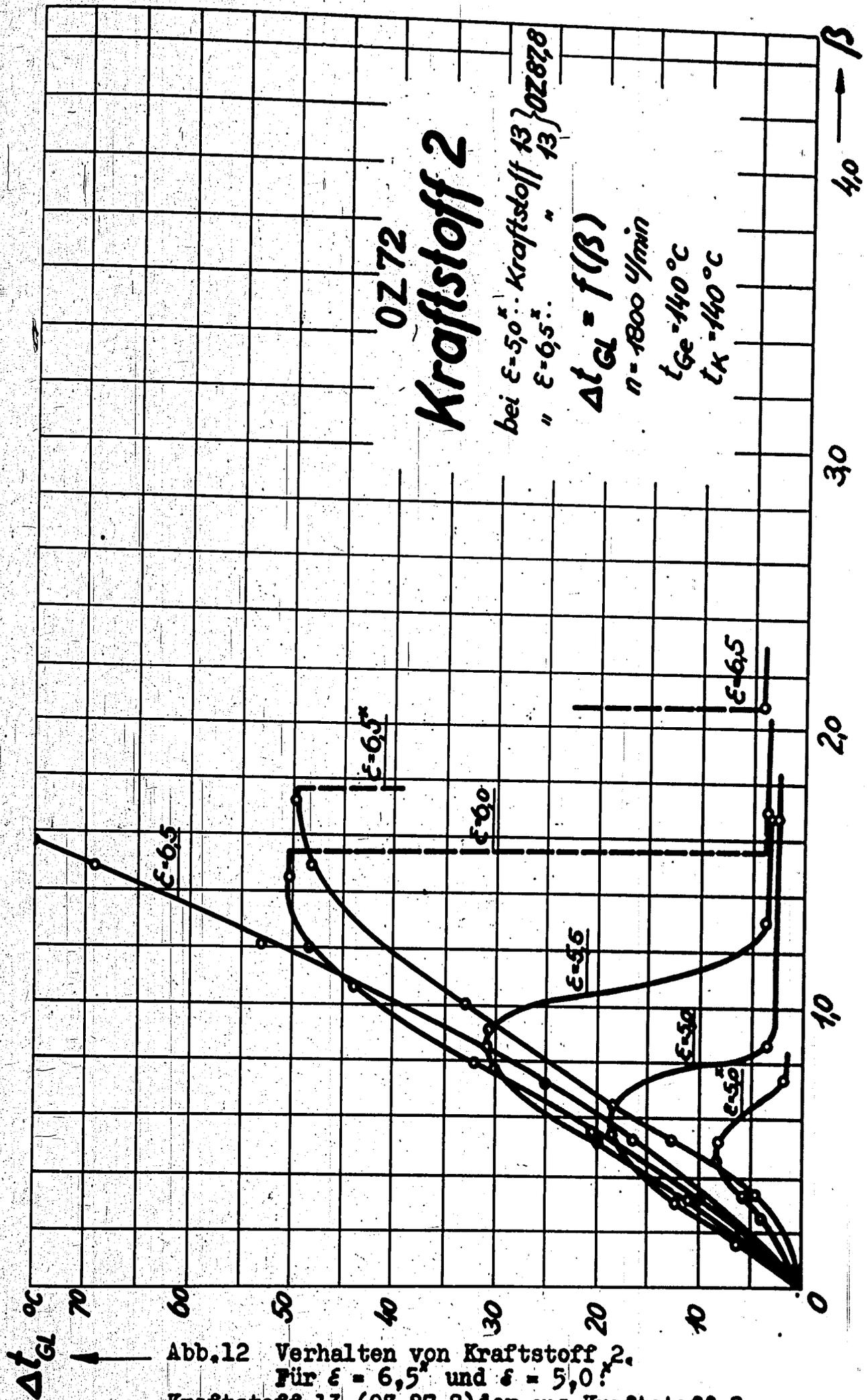


Abb.12 Verhalten von Kraftstoff 2.
 Für $\epsilon = 6,5$ und $\epsilon = 5,0$.
 Kraftstoff 13 (0Z 87,8), der aus Kraftstoff 2
 durch Bleizusatz hergestellt wurde.

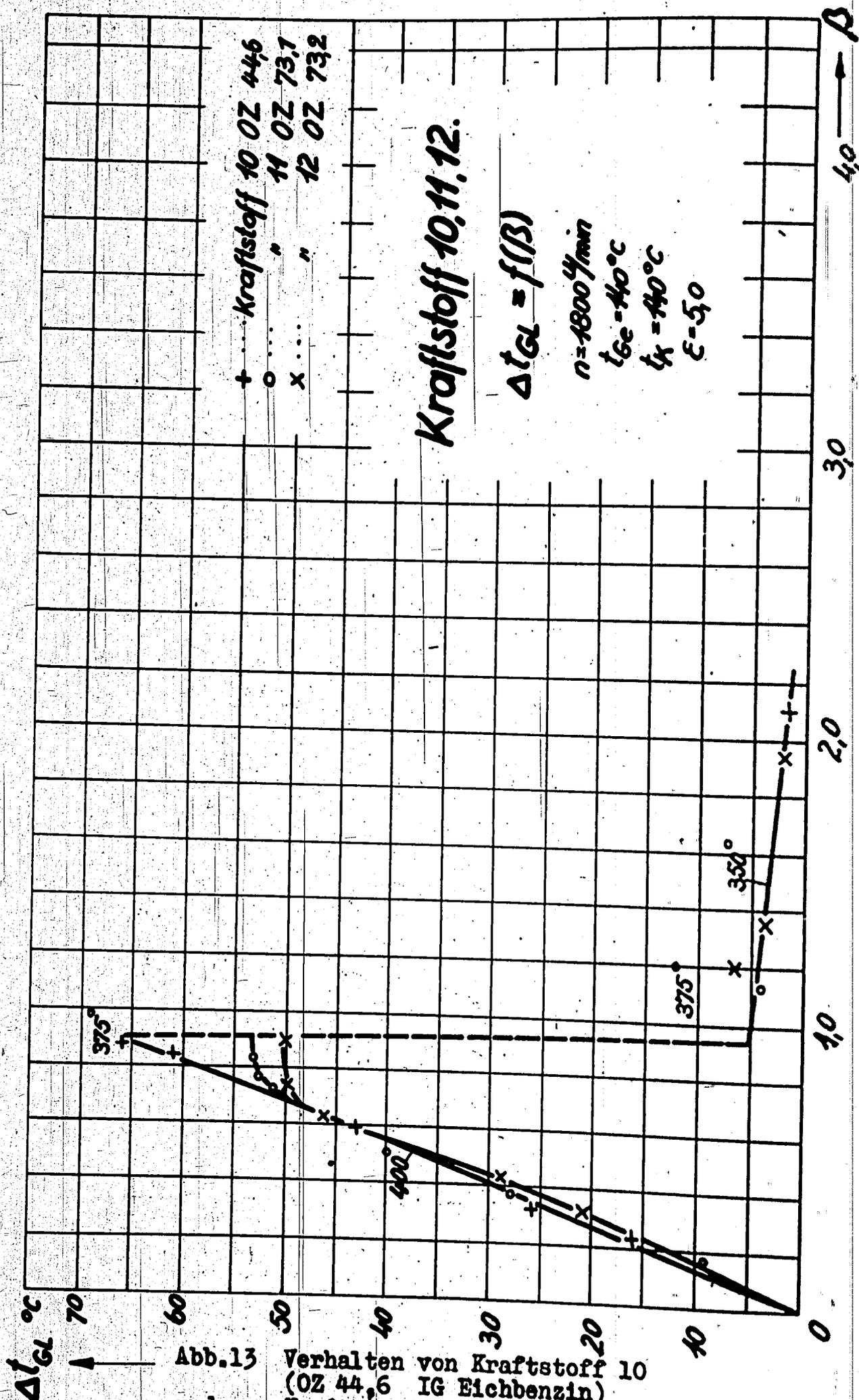


Abb.13 Verhalten von Kraftstoff 10 (OZ 44,6 IG Eichbenzin) und von Kraftstoff 10 mit Zusatz von Bleitetraethyl (Kraftstoff 11 u. 12)

6402

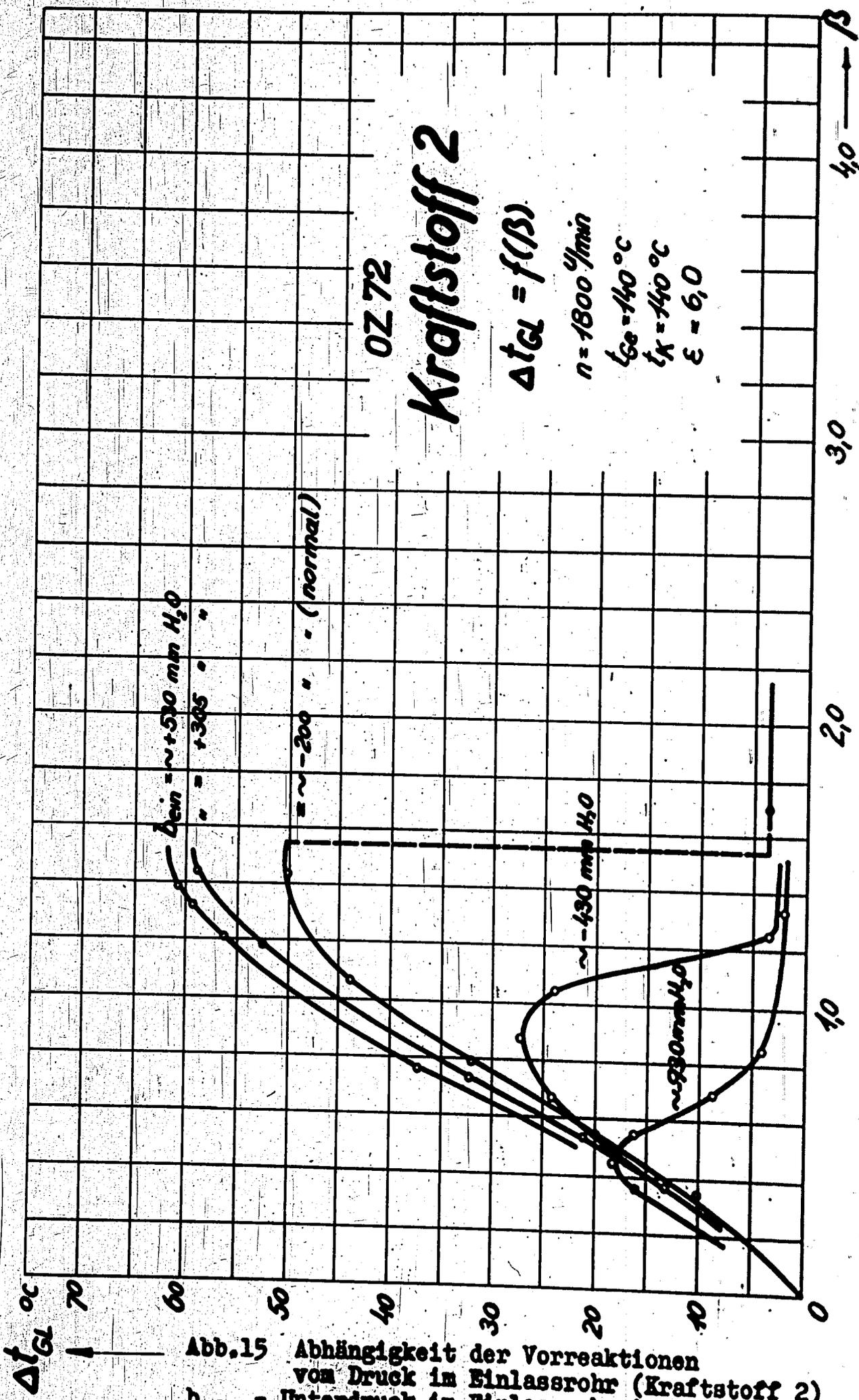


Abb.15 Abhängigkeit der Vorreaktionen vom Druck im Einlassrohr (Kraftstoff 2)
 p_{ein} = Unterdruck im Einlassrohr in mm H₂O

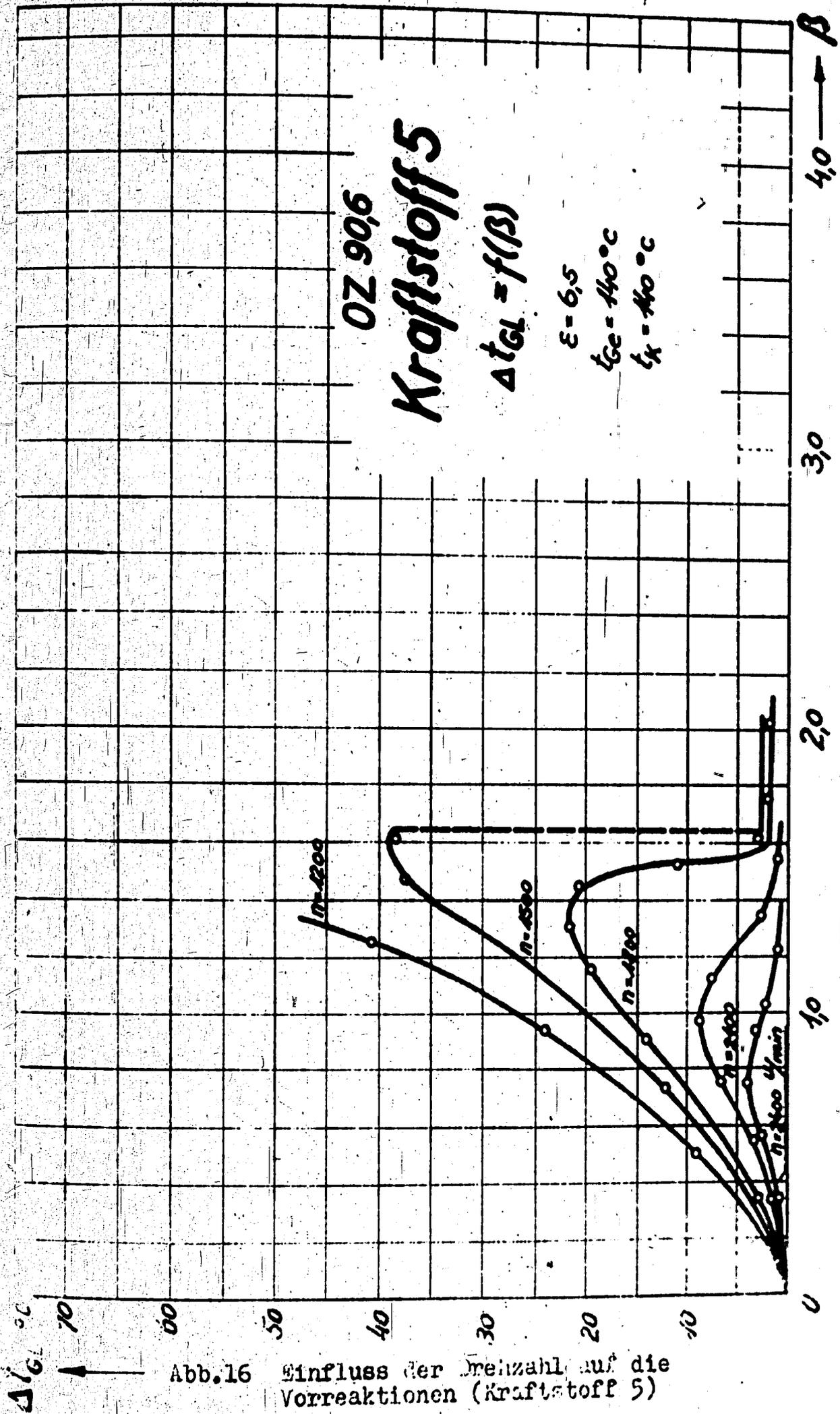
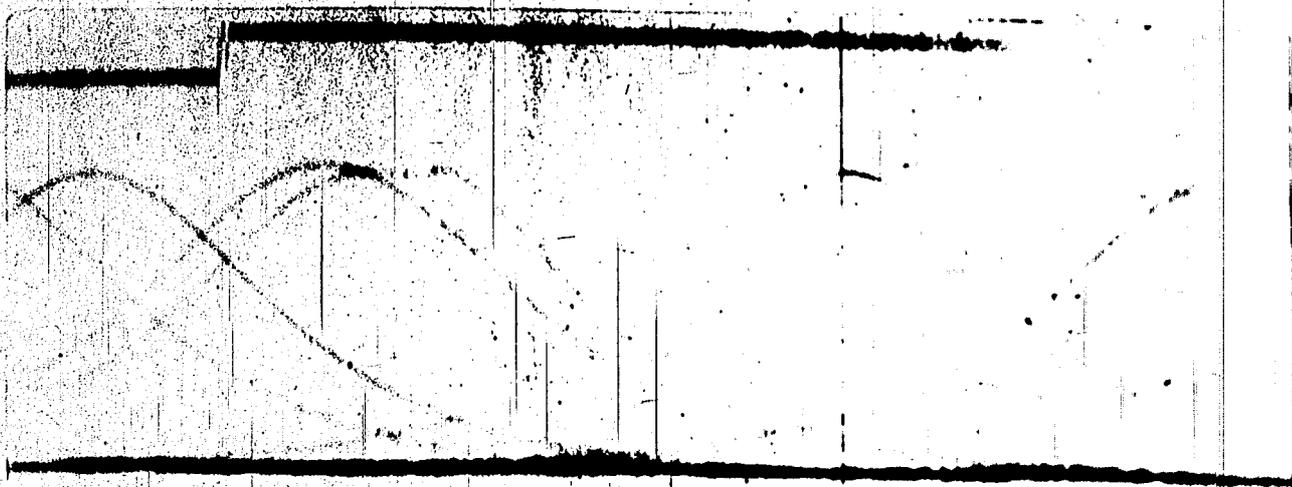


Abb.16 Einfluss der Drehzahl auf die Vorreaktionen (Kraftstoff 5)



1/500

5 OZ 74 min. SS 300

Abb. 18

Druck-Zeit-Diagramm für Kraftstoff Nr. 2
(ungebleit, OZ 72)

Drehzahl $n = 900$ Uml/min
 Verdichtungsverh. $\epsilon = 5,5$
 Brennstoffverh. $\beta = 1,0$
 $\Delta t_{GL} = 27^\circ C$

In ein Diagramm ist eine Senkrechte durch den ob. Tpkt. gelegt und das Spiegelbild der Kompressionslinie neben die Expansionslinie gezeichnet, sodass man die druckerhöhende Wirkung der Vorreaktionen erkennen kann.



a Tpkt.

1/500

9 OZ 74 min. SS 300

Abb. 19

Druck-Zeit-Diagramm für Kraftstoff Nr. 2
(ungebleit, OZ 72)

Drehzahl $n = 1800$ Uml/min
 Verdichtungsverh. $\epsilon = 6,5$
 Brennstoffverh. $\beta = 1,59$
 $\Delta t_{GL} = 50,5^\circ C$



Abb.20

Druck-Zeit-Diagramm für Kraftstoff Nr.13
(gebleit, OZ 87,8)

Drehzahl $n = 1800$ Uml/min
Verdichtungsverh. $\varepsilon = 6,5$
Brennstoffverh. $\beta = 1,4$
 $\Delta t_{GL} = 500^{\circ}C$

Die charakteristischen Buckel in den Expansionslinien der Abb.18 und 19 sind durch den Bleizusatz verschwunden.



B. 21. 11. 45. 100

Abb.21

Druck-Zeit-Diagramm für Kraftstoff Nr.3
(gebleit, OZ 87)

Drehzahl $n = 900$ Uml/min
Verdichtungsverh. $\varepsilon = 7,5$
Brennstoffverh. $\beta = 1,93$
 $\Delta t_{GL} = 590^{\circ}C$

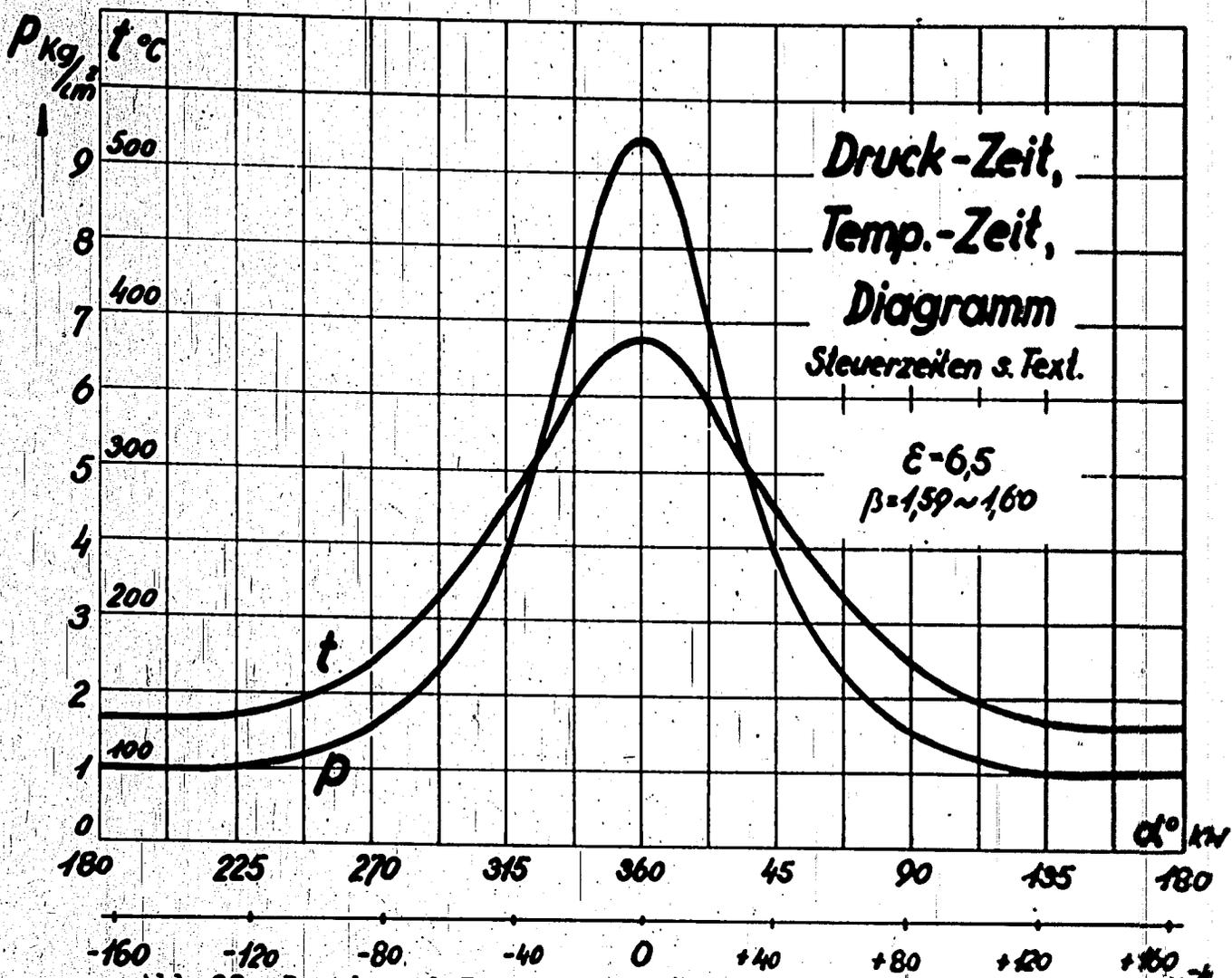


Abb. 22 Druck und Temperatur für die Verhältnisse der Abb. 19 (3. Diagr. v. r.) rechnerisch ermittelt bei $n = 1800 \text{ U/m}$

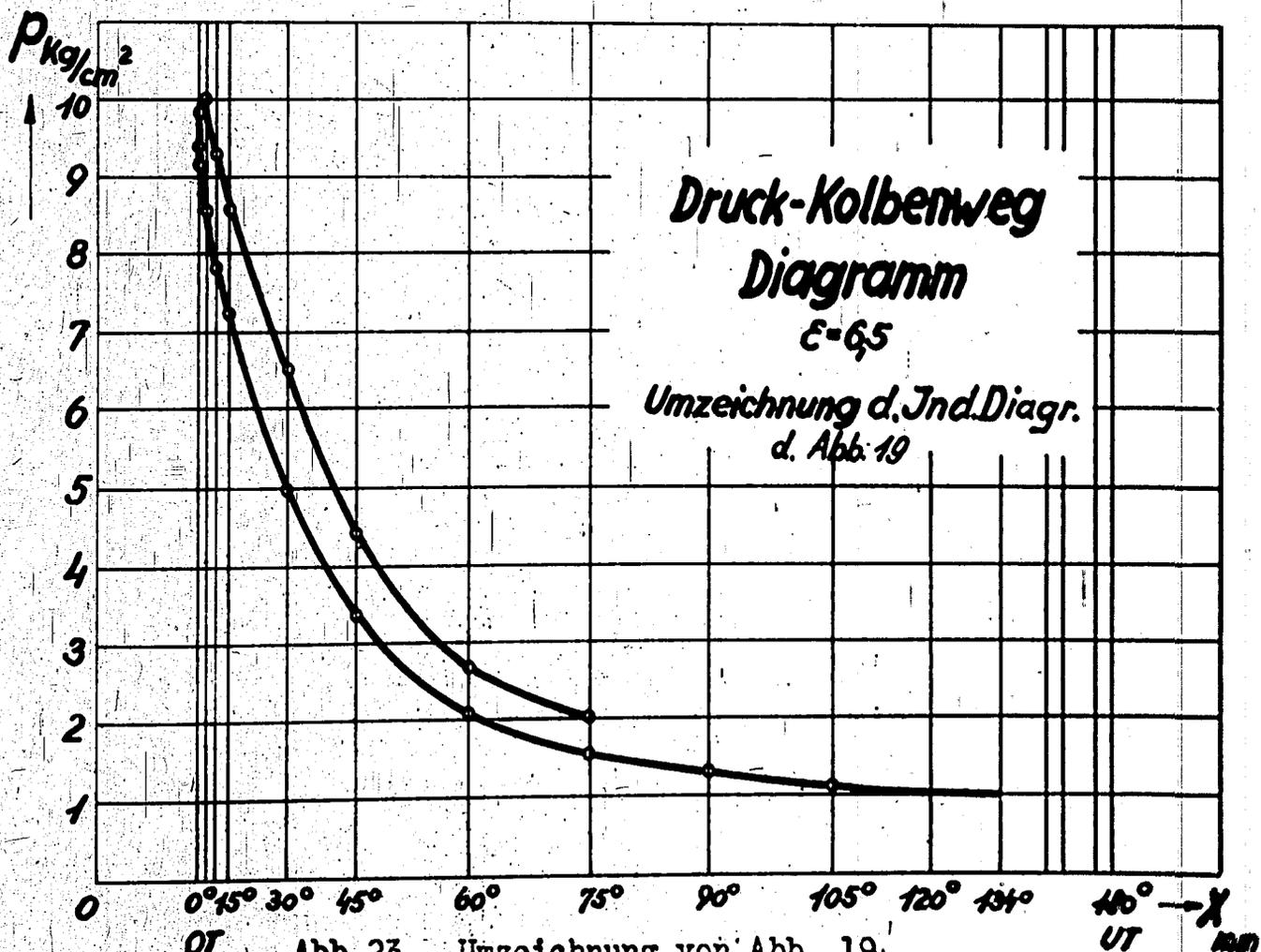


Abb. 23 Umzeichnung von Abb. 19 Druck-Kolbenweg-Darstellung.

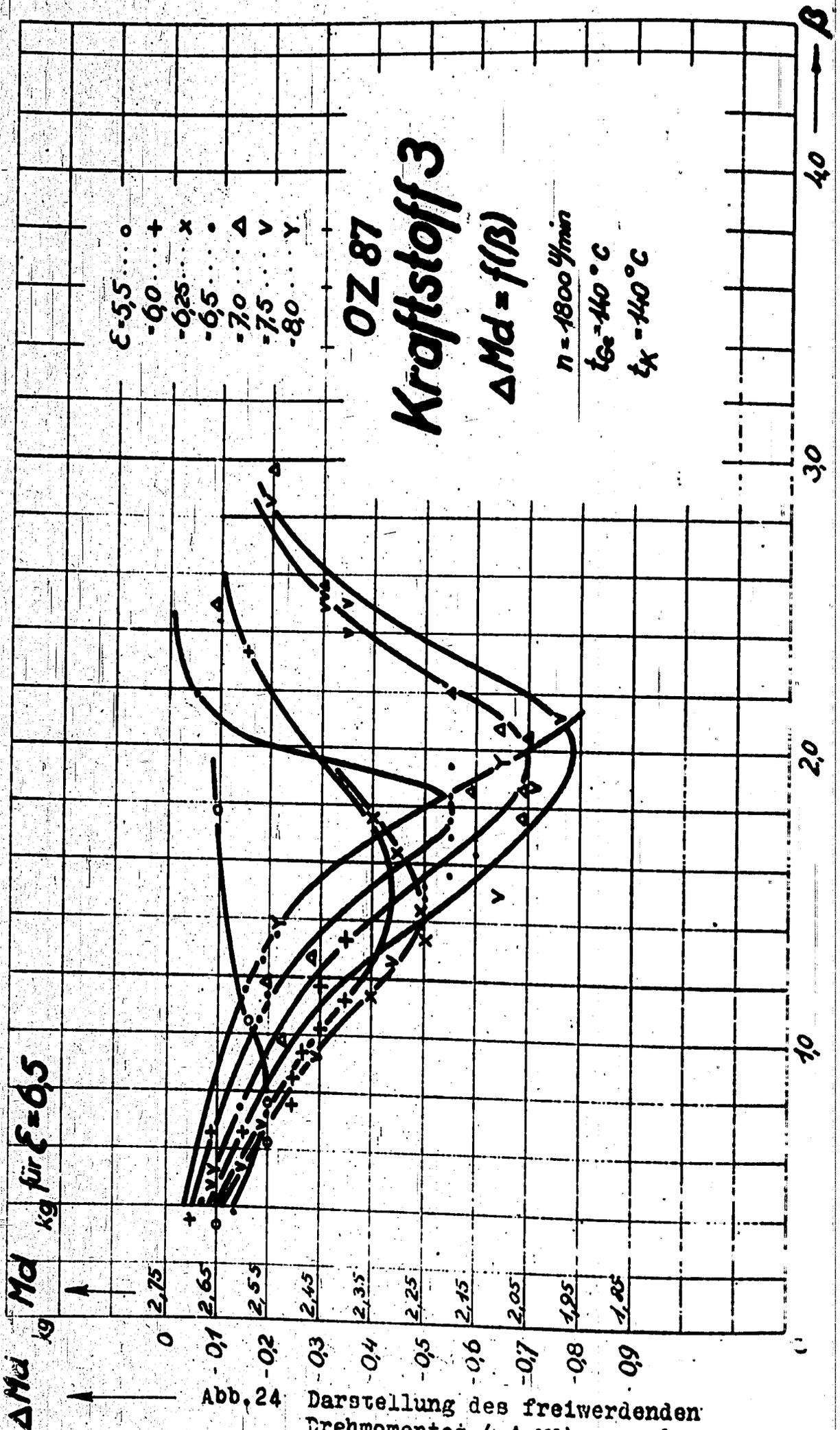


Abb. 24 Darstellung des freiwerdenden Drehmomentes (ΔMd) über β für die Verhältnisse der Abb. 5