

P. B. Schmidt

Technischer Prüfstand Op.

Bericht

Nr.

Verfasser

I-119

Tag 19

Gesehen von der Direktion

Zur Kenntnis an:

Empfänger	Ein- gang	Weiter	Unterschrift
29393			

29393

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 564.

Oppau

Zündverzögerung und Klopfverhalten von Kraftstoffen.

Zusammenfassung: Von vier Dieselmotorkraftstoffen und acht Ottomotorkraftstoffen wurden in Abhängigkeit von dem Verdichtungsdruck und von der Verdichtungs-temperatur im I.G.-Prüfdiesel Zündverzögerungskurven aufgenommen und für die untersuchten Stoffe die Konstanten a, b und n der auf der Theorie der Kettenreaktionen aufgebauten Formel für den Zündverzögerung $z_v = a \frac{a^{b/T}}{p^n}$ berechnet. Es wurde ge-

funden, daß der Zündverzögerung befriedigend dem obigen Gesetz gehorcht und daß die gefundenen Konstanten kraftstoffeigen und für die einzelnen Stoffgruppen kennzeichnend sind. Die Erfahrung, daß die Bleiempfindlichkeit bei Zündverzögerungsmessungen durch einen annähernd konstanten Faktor wiedergegeben werden kann, wurde bestätigt. Recht anschaulich läßt sich schließlich das Zündverhalten durch sogenannte Zündverzögerungsdreiecke, die durch Auftragung in einem räumlichen logarithmischen Koordinatensystem erhalten wurden, darstellen.

Abgeschlossen am: 23. Febr. 1944. L.
 Bearbeiter: Dipl. Ing. Witschakowski

Die vorliegende Ausfertigung enthält
 16 Textblätter
 Bildblätter

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger

29394

A) Zweck der Versuche.

Die Klopfestigkeit der Kraftstoffe für Otto-Motoren wird in Oktanzahlen, die Zündwilligkeit der Dieselmotoren in Cetanzahlen angegeben. Von der Oktanzahlbestimmung ist bekannt, daß sie einmal vom Motor, zum anderen auch von den Untersuchungsbedingungen, d.h. von den vorhandenen Druck- und Temperaturverhältnissen im Motor abhängig ist. Im Gegensatz dazu wird, wie zahlreiche Untersuchungen ergeben haben, die Cetanzahlbestimmung nach dem Zündverzugsverfahren¹⁾ praktisch nicht von den Betriebsbedingungen und dem Prüfmotor²⁾ beeinflusst⁺⁺⁾.

Auf die gegensätzliche Abhängigkeit von Oktanzahl und Cetanzahl²⁾ wurde bereits mehrfach in der Literatur hingewiesen. Daher erklären sich auch die Bestrebungen in der Kraftstoffforschung, die Stoffe nach einem einheitlichen Prüfverfahren zu untersuchen³⁾. Es ist ferner bekannt, daß der Klopfvorgang im Otto-Motor auch auf ein Selbstzündproblem⁴⁾ zurückgeführt werden kann. Dadurch wird es aber möglich, zur Prüfung des Klopfverhaltens von Otto-Kraftstoffen Zündverzugsmessungen im Dieselmotor heranzuziehen.

Den Klopfvorgang selbst stellt man sich so vor, daß durch Fortschreiten der Flammenfront das Restgasgemisch adiabatisch verdichtet und nach Ablauf der Induktionszeit (chemischer Zündverzug) zur Selbstzündung gebracht wird⁵⁾. Beim Dieselmotor kommt allerdings noch der physikalische Zündverzug⁶⁾, Aufheizen und Verdampfen des Kraftstofftropfens hinzu.

- 1) A.W.Schmidt. Bericht über Cetanzahlmessungen im Slowakmotor, FKFS-Motor und IG-Prüfdiesel.
- +) Lediglich in Bomben beobachtet man größere Zündverzüge.
- ++) Bestimmt man also von einem Stoff Oktanzahl und Cetanzahl, so erhält man nur eine Cetanzahl, aber mehrere Oktanzahlen, den Untersuchungen des Prüfmotors entsprechend. Vergl. W. Mitschakowski: Prüfverfahren und Oktanzahl. Öl und Kohle 42, Heft 14, S.368.
- 2) W.Wilke. Untersuchungen am Hesselman-Motor. ATZ 1938, Nr.2, S.25
- 3) F.A.F.Schmidt. Motorische und physikalische Untersuchungen über das Wesen des Klopfvorganges. MTZ 1943, Nr.2, S.41.
- 4) E.Lonn. Zündverzugsmessungen an flüssigen Kraftstoffen für Ottomotoren. Luftfahrtforschung Bd.19, Lfg.10/12, S.344.
- 5) F.A.F.Schmidt. Untersuchungen über den Zündverzug im Dieselmotor und den Klopfvorgang im Ottomotor. VDI-Sonderheft. Motor u.Kraftstoff 1939, S.65.
- 6) H.Kolfer. Der Zündvorgang im Dieselmotor. VDI-Forschungsheft Nr.392, S.15!

Der Ablauf des Selbstzündvorganges im Dieselmotor unterscheidet sich also von dem des Otto-Motors dadurch, daß im Dieselmotor eine Reaktion auch schon im teilweise aufgeheizten und verdampften Kraftstoff stattfindet, im Gegensatz zum Otto-Motor, wo bereits ein Kraftstoffdampf-Luftgemisch vorhanden ist.

Die Überlagerung beider Vorgänge macht es leider unmöglich, in physikalischen und chemischen Zündverzug zu unterteilen und jeden für sich rechnerisch zu erfassen. Vom physikalischen Zündverzug ist aber bekannt, daß er, wie verschiedene Autoren gezeigt haben, gegenüber dem chemischen Zündverzug vernachlässigbar klein ist⁷⁾. Es wurden also keine Bedenken darin gesehen, den Zündverzug im Dieselmotor, der überwiegend ein Druck- und Temperaturproblem darstellt⁸⁾, durch die aus der Kettenreaktion⁹⁾ hergeleitete und an sich nur für den chemischen Anteil des Zündverzuges geltende Beziehung

$$z_v = a \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

auszudrücken. Die Formel gilt also streng genommen nur für gasförmige Stoffe.

Die Praxis hat weiter gezeigt, daß alle Laboratoriumsversuche in besonders entwickelten Apparaturen die Verhältnisse im Motor nur angenähert wiedergeben. Aus dieser Überlegung heraus wurden die vorliegenden Untersuchungen auch am Motor selbst durchgeführt. Zu erwähnen wäre noch, daß bis jetzt ~~noch~~ keine Apparatur die Aufheizung durch die fortschreitende Flammenfront beim Reaktionsvorgang im Restgasgemisch erfaßt.

Der Zweck der vorliegenden Untersuchungen sollte sein:

- 1) Durch Zündverzugsmessungen im Dieselmotor für einige flüssige technische Stoffe die Konstanten der auf der Kettenreaktion aufgebauten Beziehung für den Zündverzug zu bestimmen.

7) W. Wentzel. Zum Zündvorgang im Dieselmotor. VDI-Sonderheft, Dieselmotoren VI, S. 26.

8) W. Wentzel. Der Zünd- und Verbrennungsvorgang im kompressorlosen Dieselmotor. VDI-Forschungsheft Nr. 366, S. 14.

9) W. Jost. Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Verbrennung im Motor. VDI-Sonderheft: Motor und Kraftstoff 1939, S. 50.

2. Aus den gefundenen Konstanten Rückschlüsse auf die verbrennungstechnische Eignung der untersuchten Stoffe zu ziehen und gegebenenfalls eine Verbindung mit den derzeitigen Größen der Klopfestigkeits- und Zündwilligkeitsbestimmung herzustellen.

B. Durchführung der Versuche.

Für die Untersuchung stand ein IG-Prüfdiesel für Cetanzahlmessung zur Verfügung. Mittels Piezoquarz-Indikator wurden zunächst Zündverzüge in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck ermittelt. Um auch für hochklopfeste, d.h. wenig zündwillige Stoffe nicht zu große und damit nicht mehr messbare Zündverzüge zu erhalten, wurde die Verbrennungsluft auf 100°C vorgewärmt. Der Einspritzbeginn wurde dabei so geändert, daß der Zündverzugsbeginn stets bei 20° v.o.T. lag. Eine weitere Versuchsreihe wurde bei unverändertem Verdichtungsdruck, aber geänderter Verdichtungstemperatur durchgeführt, um auch den Einfluß der Temperatur auf den Zündverzug kennen zu lernen.

Die Druck- und Temperaturbestimmung erfolgte rechnerisch über das Verdichtungsverhältnis unter der Annahme eines Polytropenexponenten von $n = 1,3$. Dieser Art der Bestimmung von Verdichtungsdruck und Verdichtungstemperatur wurde gegenüber der Messung mit Instrumenten der Vorzug gegeben, da bekanntlich vor allem eine genaue Temperaturmessung mit Rücksicht auf die Wärmeübertragung und auf den Strahlungsvorgang im Motor fast unmöglich ist. Versuche über den Polytropenexponenten haben gezeigt, daß der gewählte Wert den praktischen Verhältnissen recht nahe kommt. Die Berechnung von Druck und Temperatur erfolgte für den unverändert gehaltenen Zündverzugsbeginn von 20° v.o.T.

Untersucht wurden zehn technisch reine Stoffe. Die Stoffe wurden gruppenweise ausgewählt, sodaß n-Heptan und das Cetan für die Paraffine, das Isooktan für die Iso-Paraffine, das Diisobutylen für die Olefine, das Cyclohexan für die Naphthene, der Diisopropyläther für die Äther, das Methyl-t-Butylketon für die Ketone, das Alpha-Methyl-Naphthalen und das Benzol für die Aromaten und schließlich das Methanol für die Alkohole. In die Versuchsreihe mit hineingenommen wurden weiter zwei gebräuchliche Dieselkraftstoffe, das Bafische Gasöl und ein Dieselkraftstoff mit der Bezeichnung II, der einen hohen Prozentsatz an Benzin enthält. Die wichtigsten Analysendaten und die Oktan- bzw. Cetanzahl der Stoffe sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Zündverzug und Klopfverhalten von Kraftstoffen.

Zusammenfassung:

Von zwölf Stoffen wurden in Abhängigkeit von dem Verdichtungsdruck und von der Verdichtungstemperatur im I.G.-Prüfdiesel Zündverzugskurven aufgenommen und für die untersuchten Stoffe die Konstanten a , b und n der auf der Theorie der Kettenreaktionen aufgebauten Formel für den Zündverzug $z_v = a \cdot \frac{e^{-b/T}}{p^n}$ berechnet. Es wurde gefunden, daß der Zündverzug befriedigend dem obigen Gesetz genorcht und daß die ermittelten Konstanten kraftstoffeigen und für die einzelnen Stoffgruppen kennzeichnend sind. Die Erfahrung, daß die Bleiempfindlichkeit bei Zündverzugsmessungen durch einen annähernd konstanten Faktor wiedergegeben werden kann, wurde bestätigt. Recht anschaulich läßt sich schließlich das Zündverhalten durch sogenannte Zündverzugsdreiecke, die durch Auftragung in einem räumlichen logarithmischen Koordinatensystem erhalten wurden, darstellen.

Tabelle 1

Zusammenstellung der Stoffwerte.

Stoff	Summenformel	Wichte γ	Heizwert H_u kcal/kg	Siedepunkt °C	Verdampfungswärme kcal/kg	MOZ	ROZ	CaZ
n-Heptan	C_7H_{16}	0,688	10795	98,3	73,8	0	0	-
Cetan	$C_{16}H_{34}$	0,775	10400	288,0	53,0	-	-	100
Isooktan	C_8H_{18}	0,696	10680	99,3	78,0	98	99	15,0
Diisobutylen	C_8H_{16}	0,715	10430	108,0	78,0	86,7	110	10,5
Cyklohexan	C_6H_{12}	0,781	10390	82,0	86,0	76,8	84,8	15,5
Diisopropyläther	$C_6H_{14}O$	0,739	8660	67,0	69,0	100	105	12,0
Methyl-t-Butylketon	$C_6H_{12}O$	0,815	8440	106,0	-	112	-	-
α -Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	1,02	9100	247,0	-	-	-	0
Benzol	C_6H_6	0,884	9600	80,4	95,0	102	-	2,5
Methanol	CH_4O	0,797	4500	65,0	267,0	98	-	-
Bad.Gasöl	-	0,871	10400	265-350	65,0	-	-	61,5
Dieselmotortreibstoff II	-	0,790	10200	63-339	-	-	-	45

Die Stoffe unterscheiden sich einmal nicht unerheblich in ihrem Klopf- bzw. Zündverhalten, zum anderen auch stark in ihren Wichten, Heizwerten, Verdampfungswärmen und Siedepunkten. Beispielsweise besitzt Methanol von den untersuchten Stoffen den geringsten Heizwert, aber die größte Verdampfungswärme. Die höchste Motoroktanzahl weist der Methyl-t-Butylketon und die größte Cetanzahl das Cetan auf. Auf eine höhere Temperaturempfindlichkeit im Ottomotor lassen die größeren Unterschiede zwischen MOZ und ROZ bei Benzol und Cyclohexan schließen.

C. Versuchsergebnisse.

Die am IG-Prüfdiesel gemessenen Zündverzugskurven, in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck und von der Verdichtungstemperatur im Augenblick des Zündverzugsbeginns, sind in Blatt 1 und 2, Bild 1 - 12, wiedergegeben. Dabei ist auf der Ordinate der Zündverzug in ms und auf der Abszisse in Bild 1 der Verdichtungsdruck in ata und in Bild 2 die Verdichtungstemperatur in °K aufgetragen.

Bild 1 und 2 zeigen zunächst die Zündverzugskurven von den beiden bei der Cetanzahlmessung verwendeten Eichstoffen Cetan und Al-phamethylnaphthalin sowie von den beiden Dieselkraftstoffen. Entsprechend ihren Cetanzahlen ergeben RCH-Cetan und α -Methylnaphthalin die geringsten bzw. größten Zündverzüge. Dazwischen liegen die beiden paraffinischen Dieselkraftstoffe, das Badische Gasöl und der Dieselkraftstoff II.

Auf Bild 3 und 4 sind die Zündverzüge des mit 0,12 Vol% Bleitetraäthyl bzw. 2 Vol% Äthylnitrat versetzten Isooktans den Zündverzügen des reinen Isooktans gegenübergestellt. Das klopfverbessernde Verhalten des Bleizusatzes beim Isooktan kommt in den größeren Zündverzügen eindeutig zum Ausdruck. Andererseits werden durch den Zusatz von Äthylnitrat erwartungsgemäß die Zündverzüge verkleinert.

Bild 5 und 6 enthält die Zündverzugskurven von Cyclohexan und Methanol mit und ohne Bleizusatz. Dabei fällt zunächst auf, daß bei Methanol durch den Zusatz von Blei die Zündverzüge im Gegensatz zu anderen Kraftstoffen geringer werden. Wie bei der Oktanzahlbestimmung nach: man also auch bei der Zündverzugsmessung die Beobachtung, daß das Bleitetraäthyl nicht in jedem Fall das Klopfverhalten verbessert, d.h. auf die Zündverzugsbestimmung übertragen, den Zündverzug vergrößert. Da die Zündverzüge von Methanol größer sind, als die von Cyclohexan, wird aufgrund der Gegensatzlichkeit von Zünd- und Klopfverhalten die Tatsache der größeren Klopfestigkeit des Methanols auch durch die Zündverzugsmessungen bestätigt.

Auf Blatt 2, Bild 7 und 8, sind die Zündverzugskurven des klopfesten Methyl-t-Butylketons mit denen des weniger klopfesten Diisobutylens verglichen. Auch hier ergeben die Zündverzüge die gleiche Beurteilung der Stoffe wie die Oktanzahlen. Die Blei- und Äthylnitrat-Empfindlichkeit von Benzol zeigen Bild 9 und 10. Auch bei Benzol wird, wie wir bereits beim Methanol beobachtet haben, durch den Bleizusatz der Zündverzug wider erwarten verkleinert. Danach läßt sich die Zündwilligkeit des Benzols auch durch das an sich als Klopfbremse bekannte Bleitetraäthyl verbessern. Die Wirkung ist allerdings erheblich geringer als beim Äthylnitrat. Bild 9 und 10 betreffen schließlich noch das Klopf- bzw. Zündverhalten des als klopfest bekannten Diisopropyläthers und des als Eichstoff bei der Oktanzahlmessung verwendeten n-Heptans.

D. Auswertung der Ergebnisse.

Wie bereits eingangs erwähnt wurde, lassen sich beide, der Zündverzug im Dieselmotor und das Klopfen im Ottomotor, durch Kettenreaktionsvorgänge für die die Beziehung

$$z_v = a \cdot \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

gilt, näherungsweise wiedergeben.

Darin bedeuten:

z_v der Zündverzug in ms,

T die absolute Temperatur bei Zündverzugsbeginn,

p der absolute Druck bei Zündverzugsbeginn.

a, b und n kraftstoffeigene Zahlenwerte, die für einen abgegrenzten Temperatur- bzw. Druckbereich konstant angenommen werden dürfen und die Temperatur- bzw. Druckabhängigkeit beim Ablauf der Kettenreaktion aufzeigen. Bei den Werten a, b und n handelt es sich um empirische Größen, denen eine besondere physikalische Bedeutung nicht zukommt. Sie lassen sich aus Zündverzugsmessungen ermitteln.

Nimmt man zunächst unveränderten Druck an, so geht die Gleichung $z_v = a \frac{e^{b/T}}{p^n}$ in $z_v = \text{konst.} \cdot e^{b/T}$ über, oder logarithmiert in $\ln z_v = b/T + \text{konst.}$ (Gleichung einer Geraden). werden nun die $\ln z_v$, die im IG-Prüfdiesel bei dem konstanten Druck von $p = 26,4 \text{ ata}$ erhalten wurden,^{x)} über dem Quotienten $1/T$ aufgetragen, so müßten die Versuchspunkte, falls sie dem Gesetz vollständig gehorchen, auf einer Geraden liegen. Aus der Neigung der Geraden läßt sich die Konstante b ermitteln.

Trägt man weiter die gemessenen Zündverzüge in Abhängigkeit vom Druck, d.h. für unveränderte Temperatur auf, so wird aus der Ursprungsgleichung unter Verwendung einer Zwischenkonstanten c, $c = \frac{a}{p^n}$, oder logarithmiert $\ln c = \ln a - n \cdot \ln p$. Aus der graphischen Auswertung werden schließlich die beiden Konstanten a und n gefunden (Abschnitt auf der Abszisse und Neigung der Geraden). Um zu zeigen, daß für die gewählten Druck- und Temperaturbereiche die Versuchspunkte den angenommenen mathematischen Gesetzen folgen, wurden die Schaublätter 13 bis 24 auf Blatt 3 und 4 angefertigt. In diesen Schaublättern ist einmal der Zündverzug in Abhängigkeit vom Kehrwert der Verdichtungsdrucktemperatur, zum anderen die Rechnungsgröße c in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck und zwar in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Danach liegen die Versuchspunkte recht genau auf den wiedergegebenen und der Auswertung zugrunde gelegten Geraden. Auffällt noch

daß die Neigungen von unverbleiter und verbleiter Probe beispielsweise bei Isooktan (Bild 15) oder Benzol (Bild 21) in beiden Darstellungen die gleichen sind (Parallelen), d.h. die b- und n-Werte werden vom Bleitetraäthylzusatz nicht beeinflusst. Lediglich der a-Wert wird ein anderer. (Abschnitt auf der Abszisse).

Bei der rechnerischen, bzw. graphischen Ermittlung der Konstanten a, b und n der Zündverzugsformel muß hinsichtlich der Genauigkeit der gefundenen Werte noch ergänzend hinzugefügt werden, daß es sehr schwierig ist, die Zündverzüge so genau zu messen, wie die eindeutige Auswertung der Zündverzugsformel voraussetzt. Schon ganz geringe Abweichungen im Kurvenverlauf (beim Ausgleich der Versuchspunkte durch einen Kurvenzug) können sehr voneinander abweichende a,- b,- und n-Werte ergeben. Beispielsweise führen geringe Änderungen des Exponenten n schon zur Verdoppelung der a-Werte. Die rechnerisch aus den Zündverzugsmessungen nach obigem Verfahren ermittelten Konstanten a, b und n sind für die untersuchten Stoffe in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2.

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse.

S to f f	Gleichung des Zündverzugs	b/T $\frac{e}{p^n} - \frac{b \cdot \text{Wert}}{n}$ Wert $\times 10^{-3}$	a - Wert		Zündverzug *)	
			ohne Blei-tetra-äthyl	mit Blei-tetra-äthyl	ohne Blei-tetra-äthyl	mit Blei-tetra-äthyl
RCH-Cetan	$z_v = 2,3 \frac{e}{p} \frac{1450}{T}$	235 1450	2,3	-	0,55	-
Bad. Gasöl	$11 \cdot \frac{e}{p} \frac{1520}{T}$	59 1050	11	-	0,65	-
n-Heptan	$6,0 \frac{e}{p} \frac{1760}{T}$	131 1355	6,0	10,2	0,78	1,33
Diesekraftstoff V/II 15.	$\frac{e}{p} \frac{1740}{T}$	66 1160	15	-	0,98	-
Diisobutylene	$62 \cdot \frac{e}{p} \frac{3000}{T}$	27,5 1330	62	81	1,7	2,25
Cyklohexan	$52 \cdot \frac{e}{p} \frac{2380}{T}$	34,5 1220	52	72	1,8	2,5
Isooktan	$280 \cdot \frac{e}{p} \frac{1660}{T}$	7,2 770	280	380	2,02	2,75
α -Methylnaphthalin	$310 \cdot \frac{e}{p} \frac{2290}{T}$	7,9 970	310	-	2,45	-
Benzol	$270 \cdot \frac{e}{p} \frac{2270}{T}$	9,35 990	270	240	2,5	2,2
Diisopropyläther	$515 \cdot \frac{e}{p} \frac{2030}{T}$	5,0 845	515	700	2,6	3,5
Methyl-t-Butylketon	$820 \cdot \frac{e}{p} \frac{3260}{T}$	3,28 1085	820	1100	2,7	3,6
Methanol	$440 \cdot \frac{e}{p} \frac{2955}{T}$	6,3 100	440	410	2,8	2,6

x) bei 26,4 ata Verdichtungsdruck und 795°K Verdichtungstemperatur.

Die Tabelle enthält ferner die Zündverzüge ohne und mit Bleitetraäthyl bei 26,4 ata Verdichtungsdruck und 795°K Verdichtungs-temperatur. Schließlich wurden noch die $\frac{e}{p^n}$ -Werte und die $\frac{b}{n}$ -Werte gebildet. Die Stoffe wurden nach der Größe ihrer Zündverzüge geordnet. Die Reihe beginnt mit dem RCH-Cetan und endet mit dem Methanol, das einen Zündverzug von 2,8 ms, d.h. einen etwa fünfmal größeren Zündverzug als RCH-Cetan aufweist. Die kleinsten a, b und n-Werte besitzt ebenfalls das RCH-Cetan. Allgemein stellt man noch fest, daß weger die a, b und n-Werte noch die zusätzlich errechneten $\frac{e}{p^n}$ bzw. $\frac{b}{n}$ -Werte den Zündverzügen verhältnißmäßig sind. Für den Dieselmotor dürften sich Stoffe eignen, die einen $\frac{e}{p^n}$ -Wert von etwa $60 \cdot 10^{-3}$ besitzen. Hochklopfest dagegen, etwa der Oktanzahl 100 entsprechend sind Stoffe mit einem $\frac{e}{p^n}$ -Wert von unterhalb $10 \cdot 10^{-3}$.

Der Tabelle entnimmt man weiter für die untersuchten Paraffine etwa gleich große b- und n-Werte. Das isoparaffinische Isooktan zeigt dagegen bei annähernd gleichem b-Wert einen viel höheren n-Wert. Die Aromaten zeichnen sich durch erheblich größere b- und n-Werte aus. (Benzol und α -Methylnaphthalin). Die höchsten b-Werte besitzt das Diisobutylen, das Methanol und das Methyl-t-Butylketon. Es ist anzunehmen, daß die anderen Stoffgruppen, wie Olefine, Ketone usw. sich ebenfalls durch annähernd gleich hohe b- und n-Werte voneinander unterscheiden.

E. Kritik der Ergebnisse.

Eine Gegenüberstellung der am I.G.-Prüfdiesel gefundenen Zündverzüge mit anderen Untersuchungen über die Zündwilligkeit der Kraftstoffe bringt Blatt 5 und 6. Wolfer hat aufgrund von Bombenversuchen mit Dieselöl eine Formel für den Zündverzug im Dieselmotor abgeleitet, die folgendermaßen lautet: $z_v = 0,44 \frac{e}{1,19}$. In Bild 25 und 26 sind die nach der Wolfer-Formel berechneten Zündverzugskurven in Abhängigkeit von dem Verdichtungsdruck und von der Verdichtungs-temperatur aufgetragen, ferner die am I.G.-Prüfdiesel für RCH-Cetan α -Methylnaphthalin, Bad.Gasöl und Dieselkraftstoff II erhaltenen Zündverzugskurven. Danach ergibt die Wolfer-Formel viel zu große Zündverzüge, sie decken sich etwa mit den am I.G.-Prüfdiesel für α -Methylnaphthalin gefundenen. Die Begründung dürfte darin liegen daß Wolfer die Beziehung aus Bombenversuchen hergeleitet hat, die bekanntlich erheblich höhere Zündverzüge liefern als der Motor.

Daß die am I.G.-Prüfdiesel gemessenen Zündverzögerungen sich größenordnungsmäßig mit denen bei anderen Motorversuchen beobachteten decken, beweist Bild 27, wo Versuche der DVL an einem Dieselmotor mit direkter Einspritzung, mit Vorkammer und mit Lanova-Luftspeicher, in Abhängigkeit von der Luftdichte, aufgetragen sind. Bei den drei Dieselversuchen ergaben sich etwa gleich große Zündverzögerungen, sodaß sich die Zündverzögerungen durch einen einzigen Kurvenzug ausgleichen lassen. Leider ist die Cetanzahl der bei den Versuchen verwendeten Dieseldieselmotorversuchen nicht bekannt, sodaß ein Vergleich mit den I.G.-Prüfdieselversuchen nicht ohne weiteres möglich ist, es läßt sich lediglich zeigen, daß die DVL-Zündverzögerungskurve über der RCH-Cetankurve liegt und bei einer Luftdichte über 16 kg/m^3 etwa mit der von Bad.Gasöl am I.G.-Prüfdiesel gefundenen deckt. Nach den Untersuchungen am I.G.-Prüfdiesel dürfte für Dieseldieselmotorversuchen von einer Cetanzahl über 40 etwa folgende Formel gelten: $z_v = 11 \frac{e^{1520/T}}{p^{1,45}}$. Für Stoffe mit der Cetanzahl 0, beispielsweise Steinkohlenteeröle, Mittelöle usw. käme etwa die für α -Methylnaphthalin ermittelte Beziehung $z_v = 310 \frac{e^{2290/T}}{p^{2,36}}$ in Betracht^{x)}. Diese beiden Formeln beweisen, wie stark auch im Dieselmotor der Zündverzug von den untersuchten Kraftstoffen abhängt. Daß die in Bomben gefundenen Zündverzögerungen ein Mehrfaches von den im Motor gemessenen darstellen, geht auch aus Bild 16 hervor, wo für RCH-Cetan und α -Methylnaphthalin Bombenversuche von R.Müller mit den I.G.-Prüfdieselergebnissen zusammen dargestellt sind. Sie beweisen, daß man sich bei Zündverzögerungsmessungen keinesfalls auf Bombenversuche beschränken darf. Während die auf Blatt 5 zusammengestellten Ergebnisse die beiden Eichstoffe für Cetanzahlmessung und zwei Dieseldieselmotorversuche betreffen, enthält Blatt 6 eine Gegenüberstellung der Stoffe, die man aufgrund ihres Klopfverhaltens mehr im Ottomotor verwenden dürfte. So gibt Bild 29 die von Lonn in der DVL-Apparatur von n-Heptan gefundenen Zündverzögerungen mit den am I.G.-Prüfdiesel gemessenen wieder.

x) Soll die Zündverzögerungsformel auch noch die Cetanzahl enthalten, so kann man nach Wolfer schreiben $z_v = \text{konst.} \frac{e^{CaZ/T}}{p^{CaZ}}$, worin CaZ die Cetanzahl bedeutet. Da der Zündverzug nicht nur ein Druck- und Temperaturproblem darstellt, sondern auch noch von anderen Faktoren, beispielsweise durch das Luftverhältnis, durch das Vorhandensein inerten Gase, oder durch die Mantelbeschaffenheit des Verbrennungsraumes und andere beeinflusst wird, hat es wenig Sinn, Cetanzahlen danach zu bestimmen.

Für gleich große Zündverzögerungen müßte die am I.G.-Prüfdiesel beobachtete Zündverzögerungskurve mit n-Heptan zwischen den beiden Kurven von Lonn liegen. Tatsächlich sind die Zündverzögerungen des I.G.-Prüfdiesels erheblich geringer. Ähnliche Ergebnisse entnimmt man Bild 30, wo für ein Bleibenzin (Oktanzahl und Bleigehalt waren leider nicht bekannt) die Zündverzögerungskurve zusammen mit der von verbleitem Diisobutylen am I.-G.-Prüfdiesel ermittelten dargestellt ist. Auch hier findet man im Motor wieder erheblich geringere Zündverzögerungen.

Die schon mehrfach beobachtete Tatsache, daß die Bleiempfindlichkeit bei Zündverzögerungsmessungen und auch bei der Prüfung des Klopfverhaltens im aufgeladenen Ottomotor durch einen kraftstoffabhängigen, annähernd konstanten Faktor ausgedrückt werden kann, wurde sowohl durch die Zündverzögerungsmessungen am I.-G.-Prüfdiesel als auch durch Überladeversuche am I.-G.-Versuchsmotor K, einem Kleinüberlademotor, bestätigt.

In Bild 31 wurde das Verhältnis aus den Zündverzögerungen eines verbleiten und unverbleiten Benzins nach Untersuchungen von Lonn gebildet. Danach ist der Faktor für die Bleiempfindlichkeit zwar von dem Verdichtungsdruck, aber nicht von der Verdichtungs-temperatur abhängig. Für einen Verdichtungsdruck von 21,31 und 41 ata wurden Durchschnittswerte von 1,2; 1,4 und 1,7 für den Bleiempfindlichkeitsfaktor erhalten.

Bild 22, 23 und 24 gibt Klopfgrenzwerte bei einem bestimmten Luftverhältnis in Abhängigkeit von der Ladelufttemperatur für eine Anzahl von verbleiten und unverbleiten Kraftstoffen an einem wassergekühlten Flugmotorzylinder (Bild 32) und am IG-Versuchsmotor K wieder. Für die am I.G.-Prüfdiesel und am I.G.-Versuchsmotor K geprüften Stoffe wurden folgende Faktoren für die Bleiempfindlichkeit gefunden.

Tabelle 3

Zusammenstellung der Werte für die Bleiempfindlichkeit.

S t o f f	Werte der Bleiempfindlichkeit	
	1) Nach dem Überladeverfahren am IG-Versuchsmotor K	2. Nach dem Zündverzögerungsverfahren am IG-Prüfdiesel.
Diisobutylen	1,45	1,31
Cyklohexan	1,28	0,89
Benzol	1,27	0,93
Methanol	1,61	1,36
Isoktan	1,36	1,36
Diisopropyläther		

Nach beiden Verfahren weisen Benzol und Methanol die geringste Bleiempfindlichkeit auf. Andererseits ist in beiden Fällen die Bleiempfindlichkeit von Cyklohexan die größte. Es wäre schließlich noch darauf hinzuweisen, daß, während bei Überladung die Werte in jedem Fall über 1 liegen, bei den Zündverzugsmessungen der Bleiempfindlichkeitswert auch kleiner als 1 sein kann, dies bedeutet aber, daß durch den Zusatz von Bleitetraäthyl die Zündverzögerungen bei Benzol und Methanol nicht, wie erwartet, größer, sondern kleiner werden.

Bei den aus Zündverzugsmessungen ermittelten Faktoren für die Bleiempfindlichkeit ist noch zu bemerken, daß sich die Zündverzugsformeln für einen verbleiten und unverbleiten Kraftstoff nur durch den Faktor a unterscheiden. Man kann danach für einen verbleiten Kraftstoff folgende Zündverzugsformeln schreiben:

$$z_v \text{ verbleit} = a_{\text{unverbleit}} \cdot f \cdot \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

worin f den Bleiempfindlichkeitsfaktor darstellt.

In Bild 35 auf Blatt 5 wurden die Zündverzögerungen und die Rechnungswerte $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ über der Oktanzahl aufgetragen. Aufgrund der Gegensätzlichkeit von Klopfverhalten und Zündwilligkeit nehmen mit wachsender Oktanzahl die Zündverzögerungen zu. Die Größe des Zündverzugs stellt somit auch ein Maß für das Klopfverhalten eines Stoffes dar.

Umgekehrt ergeben Stoffe mit hoher Oktanzahl geringe $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ -Werte. Beispielsweise entspricht einer Motoroktanzahl von 100 ein $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ -Wert von etwa 10×10^{-3} . Daß Oktanzahl und Zündverzug bzw. $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ -Wert genau verhältig sind, wurde nicht erwartet und ist auch aufgrund der unterschiedlichen Prüfbedingungen nicht möglich. Weiter ist bekannt, daß für die Beurteilung des Kraftstoff-Klopfverhaltens eine einzige Größe, wie beispielsweise die Oktanzahl, nicht ausreicht, und es wurde in der Literatur auch schon mehrfach darauf hingewiesen^{10) 11)}. Nach F.A.F. Schmidt sind für eine eindeutige Beurteilung des Kraftstoffklopfverhaltens drei, mindestens jedoch zwei Größen erforderlich. Dabei kann allerdings die Oktanzahl Berücksichtigung finden. Als weitere Beurteilungsgröße wurde der $\frac{b}{n}$ -Wert vorgeschlagen. Nach den Untersuchungen am IG-Prüfdiesel scheint jedoch der Faktor $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ geeigneter zu sein, denn wie Bild 26 zeigt, können beispielsweise einem $\frac{b}{n}$ -Wert von 12×10^2 zwei stark voneinander abweichende $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ -Werte, nämlich 35 und 65×10^{-3} entsprechen. Dieser Faktor erfaßt zudem noch die Druck- bzw. Temperaturabhängigkeit beim Ablauf der Ketten-

reaktion und ist auch in der Formel für den Zündverzug enthalten. Wie stark der Faktor von den Größen b bzw. n beeinflusst wird, zeigen die beiden Bilder 37 und 38., wo in Abhängigkeit vom Druck die verhältnismäßige Zunahme des Wertes p^n und in Abhängigkeit von der Temperatur die des Wertes $e^{b/T}$ aufgetragen wurde. Erhöht man beispielsweise bei 25 ata Druck den Wert n auf das dreifache (von $n = 1$ auf $n = 3$) bzw. bei 800°K den Wert e um den gleichen Betrag (von $b = 1000$ auf $b=3000$) so ist im ersten Fall der Wert p^n auf das 2,8-fache, im anderen Fall der Wert $e^{b/T}$ auf das 1,8-fache des Grundwertes angewachsen. Die schnellere Zunahme des p^n -wertes, dem $e^{b/T}$ -wert gegenüber ist damit unverkennbar.

Unter vereinfachten Bedingungen läßt sich die Induktionszeit bzw. der Zündverzug nach Semenov auch durch die Funktion

$$z_v = \text{konst.} \frac{e^{E/RT}}{p^n}$$

darstellen. Darin bedeutet E die Aktivierungsenergie und R die Gaskonstante. Die Aktivierungsenergie pflegt man in kcal/Mol anzugeben, die Gaskonstante R ist dabei mit 2 cal einzusetzen. Stellt man der obigen Beziehung die Formel

$$z_v = a \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

gegenüber, so ergibt sich durch Vergleich, daß der Wert b dem Quotienten E/R entsprechen muß. Damit wird es möglich, die scheinbare^{x)} Aktivierungsenergie E auch für die im IG-Prüfdiesel untersuchten Kraftstoffe zu bestimmen. In der folgenden Tabelle sind die nach der Formel $E = b \cdot R$ berechneten scheinbaren Aktivierungsenergien der am IG-Prüfdiesel untersuchten Stoffe zusammengestellt.

- 10) H. Ernst. Zündverzug und Bewertung der Kraftstoffe. Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für Diesel- und Otto-Kraftstoffe.
- 11) O. Widmaier. Zündverzugsmessungen an Diesel- und Otto-Kraftstoffen. Deutsche Kraftstoffforschung, Heft 63.
- x) Man darf nur von einer scheinbaren Aktivierungsenergie sprechen, da der Wert E , der aus der Zündverzugsleichung mit Hilfe von empirischen Konstanten ermittelt wurde, nicht mehr der Aktivierungsenergie im üblichen Sinne entspricht.

Tabelle 4

Zusammenstellung der scheinbaren Aktivierungsenergien.

Stoff	Scheinbare Aktivierungsenergie E kcal/Mol	Summenformel	Strukturformel	Verdampfungswärme kcal/Mol
Cetan	2,9	$C_{16}H_{34}$	$CH_3-CH_2 \dots CH_2CH_3$	12,2
Heptan	3,4	C_7H_{16}	$CH_3-CH_2 \dots CH_2CH_3$	7,4
DK IX/II	3,5	—	—	—
Bad.Gasöl	3,0	—	—	—
Isooktan	3,3	C_8H_{18}	$CH_3-\overset{\overset{CH_3}{ }}{C}-CH_2-\overset{\overset{CH_3}{ }}{C}-CH_3$	8,8
Benzol	4,5	C_6H_6	—	7,4
α -Methylnaphthalin	4,6	$C_{11}H_{10}$	—	—
Cyklohexan	4,8	C_6H_{12}	—	7,3
Diisopropyläther	4,1	$C_6H_{14}O$	$CH_3-\overset{\overset{CH_3}{ }}{C}-O-\overset{\overset{CH_3}{ }}{C}-CH_3$	7
Methanol	5,9	CH_4O	CH_3-OH	8,5
Methyl-t-Butylketon	6,5	$C_6H_{12}O$	$CH_3-\overset{\overset{CH_3}{ }}{C}-\overset{\overset{O}{ }}{C}-CH_3$	—
Diisobutylene	6,0	C_8H_{16}	$CH_3-\overset{\overset{CH_3}{ }}{C}-CH_2-\overset{\overset{CH_3}{ }}{C}=CH_2$	8,8

Allgemein zeigen zunächst die paraffinischen bzw. isoparaffinischen Stoffe etwa die gleiche und von sämtlichen untersuchten Kraftstoffen die geringsten Werte für die scheinbare Aktivierungsenergie. Auch bei den Aromaten macht man die Feststellung, daß sie annähernd die gleichen Werte für die scheinbare Aktivierungsenergie besitzen. Allerdings sind sie größer als bei den paraffinischen bzw. isoparaffinischen. Das würde bedeuten, daß zur Aufspaltung der Ringkohlenwasserstoffe eine höhere scheinbare Aktivierungsenergie notwendig ist. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich für die Sauerstoffträger, dem Methyl-t-Butylketon, dem Methanol und dem Diisopropyläther. Ferner fällt auf, daß auch Diisobutylene eine verhältnismäßig hohe scheinbare Aktivierungsenergie hat, was auf die Doppelbindung zurückgeführt werden dürfte.

Es müßte noch eine größere Anzahl von Stoffen einer bestimmten Gruppe beispielsweise von der der Olefine, der Alkohole usw. untersucht werden, um die bei den Paraffinen und Aromaten gemachte Feststellung der annähernd gleichen Aktivierungsenergie auch für die anderen Gruppen zu beweisen. Allgemein beobachtet man, daß die aus den Zündverzugsmessungen am I.G.-Prüfdiesel ermittelten scheinbaren Aktivierungsenergien erheblich kleiner sind als bei Bombenversuchen, wo man auf Werte von 30 - 50 kcal/Mol kommt. Wolfer erhält allerdings aufgrund seiner für den Zündverzug am Dieselmotor abgeleiteten Beziehung auch nur einen Wert von etwa 9 kcal/Mol für E.

Der Vollständigkeit halber sind in der Tabelle auch die Verdampfungswärmen der Stoffe angegeben. Hierzu stellt man fest, daß die Verdampfungswärmen bei sämtlichen untersuchten Stoffen nicht unerheblich höher sind als die E-Werte, bei Cetan beträgt sie etwa das fünf-fache, bei Diisobutylen dagegen nur etwa das 1,3-fache der scheinbaren Aktivierungsenergie. Streng genommen gelten die aus den Zündverzugsmessungen ermittelten E-Werte nur für gasförmige Kraftstoff-Luftgemische¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾, während bei den Versuchen am IG-Prüfdiesel der Kraftstoff flüssig eingebracht wurde.

Sehr anschaulich läßt sich noch das Zünd- bzw. Klopfverhalten der Kraftstoffe durch die räumlichen Darstellungen auf Blatt 6 wiedergeben. Logarithmiert man nämlich die Gleichung für den Zündverzug,

$$z_v \cong a \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

so erhält man

$$\ln z_v = \ln a + b/T - n \ln p.$$

Dies ist aber die Gleichung für die Ebene im Raum; werden nun je zwei von den drei Veränderlichen $\ln z_v$, $\ln p$ und $1/T$ gleich Null gesetzt, so erhält man die Schnitte der räumlichen Ebene mit den Koordinatenebenen, dreieckige Flächen, die man als Zündverzugsdreiecke bezeichnen könnte. Sie geben die Abhängigkeit des Zündverzugs von dem Verdicht

- 12) F.A.F. Schmidt. Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündverzug und Klopfvorgang. VDI-Forschungsheft 392, S.1.
- 13) F.A.F. Schmidt. Beeinflussung von Gemischbildung und Zündungsvorgängen im Verbrennungsmotor. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung 1939, Heft 9.
- 14) M. Scheuermeyer und H. Steigerwald. Die Messung des Zündverzugs verdichteter Kraftstoff-Luftgemische zur Untersuchung der Klopfneigung. MTZ 8/9, Sept. 1943.

b.w.

tungsdruck und von der Verdichtungstemperatur wieder. Den Flächeninhalt der Dreiecke könnte man gleichfalls als Maß für die Zündwilligkeit bzw. Klopfestigkeit der Stoffe heranziehen. Sehr zündwillige Kraftstoffe, wie Cetan oder Heptan, würden danach einen geringen Flächeninhalt aufweisen.

~~chemischen Zündverzugs~~ zum. Der Ablauf des Selbstzündvorganges im Dieselmotor unterscheidet sich also von dem des Ottomotors dadurch, daß im Dieselmotor eine Reaktion auch schon im teilweise aufgeheizten und verdampften Kraftstoff stattfindet, im Gegensatz zum Otto-Motor, wo bereits ein vollkommenes Kraftstoffdampf-Luftgemisch vorhanden ist.

Es ist daher unmöglich, in physikalischen und chemischen Zündverzugs zu unterteilen und jeden für sich rechnerisch zu erfassen. Ganz abgesehen davon, daß der physikalische Zündverzugs, wie verschiedene Autoren gezeigt haben, gegenüber dem chemischen Zündverzugs verhältnismäßig klein ist⁷⁾. Es werden

Es wurden also keine Bedenken darin gesehen, den Zündverzugs im Dieselmotor, der überwiegend ein Druck- und Temperaturproblem darstellt⁸⁾, durch die aus der Kettenreaktion⁹⁾ hergeleitete Beziehung

$$z_v = a \frac{b/T}{p^n}$$

und an sich nur für den chemischen Anteil des Zündverzuges geltende Beziehung

$$z_v = a \frac{b/T}{p^n}$$

heranzusetzen. Die Formel gilt also streng genommen nur für gasförmige Stoffe. Nur gasförmige Stoffe MULLIGKEIT hat, es ist also die Anheizung und Verflüchtigung des flüssigen Kraftstoffes während des Einspritzvorganges in den Dieselmotor nicht berücksichtigt wird.

Die Praxis hat weiter gezeigt, daß alle Laboratoriumsversuche in besonders entwickelten Apparaturen die Verhältnisse im Motor nur annähernd wiedergeben können. Aus dieser Überlegung heraus wurden die vorliegenden Untersuchungen auch am Motor selbst durchgeführt. Zu erwähnen wäre noch, daß bis jetzt noch keine Apparatur die Aufheizung durch die fortschreitende Flammenfront beim Reaktionsvorgang im Restgasgemisch erfäßt.

- 7) W. Wentzel. Zum Zündvorgang im Dieselmotor. VDI-Sonderheft, Dieselmotoren VI, S. 26.
- 8) W. Wentzel. Der Zünd- und Verbrennungsvorgang im kompressorlosen Dieselmotor. VDI-Forschungsheft Nr. 366, S. 14.
- 9) W. Jost. Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Verbrennung im Motor. VDI-Sonderheft: Motor und Kraftstoff 1939, S. 50.

Der Zweck der vorliegenden Untersuchungen sollte sein:

1. Durch Zündverzugsmessungen im Dieselmotor für einige flüssige technische Stoffe die Konstanten der auf der Kettenreaktion aufgebauten Beziehung für den Zündverzug zu bestimmen.
2. Aus den gefundenen Konstanten Rückschlüsse auf die verbrennungstechnische Eignung der untersuchten Stoffe zu ziehen und gegebenenfalls eine Verbindung mit den derseitigen Größen der Klopfestigkeits- und Zündwilligkeitsbestimmung herzustellen.

B. Durchführung der Versuche.

Für die Untersuchung stand ein IG-Prüfdiesel für Cetanzahlmessung zur Verfügung. Dieser war mit einer regelbaren elektrischen Heizung für die Vorwärmung der Verbrennungsluft ausgerüstet worden. Mittels Piezo-Quarzindikator wurden zunächst die Zündverzüge in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck ermittelt. Um auch für hochklopfeste, d.h. wenig zündwillige Stoffe nicht zu große und damit nicht mehr meßbare Zündverzüge zu erhalten, wurde die Verbrennungsluft auf 100°C vorgewärmt. Der Einspritzbeginn wurde dabei so geändert, daß der Zündverzugsbeginn stets bei 20° v.o.T. lag. Eine weitere Versuchsreihe wurde bei unverändertem Verdichtungsdruck, aber geänderter Verdichtungs-temperatur durchgeführt, um auch den Einfluß der Temperatur auf den Zündverzug kennen zu lernen.

Die Druck- und Temperaturbestimmung bei τ erfolgte rechnerisch über das Verdichtungsverhältnis unter der Annahme eines Polytropenexponenten von $n = 1,3$. Auf die gleiche Weise wurde auch die Verdichtungs-temperatur im Augenblick des Zündverzugsbeginns gefunden. Dieser Art der Bestimmung von Verdichtungsdruck und Verdichtungs-temperatur wurde gegenüber der Messung mit Instrumenten der Vorsug gegeben, da bekanntlich vor allem eine genaue Temperaturmessung mit Rücksicht auf die Wärmeübertragung und auch den Strahlungsvergang in Motor ziemlich schwierig ist. Versuche über den Polytropenexponenten haben gezeigt, daß der gewählte Wert den praktischen Verhältnissen recht nahe kommt. Die Berechnung von Druck und Temperatur erfolgte für den unverändert gehaltenen Zündverzugsbeginn von 20° v.o.T.

Untersucht wurden ^{z. B.} ~~zusätzlich~~ ^{technisch} reine Stoffe. Die Stoffe wurden gruppenweise ausgewählt, so daß n-Heptan und das Cetan für die Paraffine, das Isooktan für die Iso-Paraffine, das Diisobutylen für die Olefine, das Cyclohexan für die Naphthene, der Diisopropyläther für die Äther, das Methyl-t-Butylketon für die Ketone, das Alpha-Methyl-Naphthalin und das Benzol für die Aromaten und schließlich das Methanol für die Alkohole. In die Versuchsreihe mit hineingenommen wurden ^{weiter} zwei gebräuchliche Dieselmotortreibstoffe, das Badische Gasöl und ein Dieselmotortreibstoff mit der Bezeichnung II, der einen hohen Prozentsatz an Benzin enthält. Die wichtigsten Analysendaten und die Oktan-bezw.Cetanzahl der Stoffe sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

für die Olefine, das Cyclohexan für die Naphthene, das Isooktan für die Iso-paraffine, der Diisopropyläther für die klopffesten Äther, das Methyl-t-Butylketon für die Ketone, das Benzol für die Aromaten und das Methanol für die Alkohole. Bei den Stoffen handelt es sich um technisch reine Verbindungen. Die wichtigsten Analysendaten der Stoffe mit ihren Oktan- und Cetanzahlen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 1. Zusammenstellung der Stoffwerte.

Stoff	Summenformel	Wichte γ	Heizwert kcal/kg	Siedepunkt °C	Verdampfungswärme kcal/kg	MOZ	ROZ	CeZ
Cetan	$C_{16}H_{34}$	0,775	10400	288,0	53	-	-	100
α-Methylnaphthalin	$C_{12}H_{10}$	1,02	9100	247,0	-	-	-	0
Bad.Gasöl	-	0,871	10400	265-350	65	-	-	61,5
Dieselmotortreibstoff II	-	0,790	10200	63-339	-	-	-	45
n-Heptan	C_7H_{16}	0,688	10795	98,3	73,8	0	0	-
Diisobutylen	C_8H_{16}	0,715	10430	108,0	78,0	86,7	110	10,5
Cyclohexan	C_6H_{12}	0,781	10390	82,0	86,0	76,8	84,8	15,5
Isooktan	C_8H_{18}	0,696	10680	99,3	78,0	98	99	15,0
Diisopropyläther	$C_6H_{14}O$	0,739	8660	67,0	69,0	100	105	12,0
Methyl-t-Butylketon	$C_6H_{12}O$	0,815	8440	106,0	-	112	-	-
Benzol	C_6H_6	0,884	9600	80,4	95,0	102	-	2,5
Methanol	CH_4O	0,797	4500	65,0	267,0	98	-	-

Die Stoffe unterscheiden sich einmal nicht unerheblich in ihrem Klopf- bzw. Zündverhalten, zum anderen auch stark in ihren Wichten, Heizwerten. Beispielsweise besitzt Methanol von den untersuchten Stoffen den geringsten Heizwert, aber die größte Verdampfungswärme. Die höchste Motoroktanzahl weist der Methyl-t-Butylketon und die größte Cetanzahl das Cetan auf.

empfindlichkeit im Ottomotor lassen die größeren Unterschiede zwischen MOZ und ROZ bei Benzol und Cyklohexan schließen.

C. Versuchsergebnisse.

Die am IG-Prüfdiesel gemessenen Zündverzugskurven, in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck und von der Verdichtungstemperatur im Augenblick des Zündverzugsbeginns, sind in Blatt 1 und 2, Bild 1 - 12, wiedergegeben. Dabei ist auf der Ordinate der Zündverzug in ms und auf der Abszisse in Bild 1 der Verdichtungsdruck in ata und in Bild 2 die Verdichtungstemperatur in K aufgetragen.

Bild 1 und 2 zeigen zunächst die Zündverzugskurven von den beiden bei der Cetanzahlmessung verwendeten Reinstoffe Cetan und Alphamethylnaphthalin und von den beiden Dieselkraftstoffen.

Die Zündverzugskurven der beiden Dieselkraftstoffe liegen etwa auf der Mitte von RCH-Cetan und -Methylnaphthalin.

Auf Bild 2 und 5 sind die Zündverzüge des mit 0,12 Vol% Bleitetraäthyl bzw. 2 Vol% Äthylnitrat versetzten Isooktans den Zündverzügen des reinen Isooktans gegenübergestellt. Das klopfverbessernde Verhalten des Bleizusatzes beim Isooktan kommt in den größeren Zündverzügen eindeutig zum Ausdruck. Andererseits werden durch den Zusatz von Äthylnitrat erwartungsgemäß die Zündverzüge verkleinert.

Bild 3 und 6 enthält die Zündverzugskurven von Cyklohexan und Methanol mit und ohne Bleizusatz. Dabei fällt zunächst auf, daß bei Methanol durch den Zusatz von Blei die Zündverzüge im Gegensatz zu anderen Kraftstoffen geringer werden. Man kann also auch bei den Zündverzugsmessungen, wie bei der Oktanzahlbestimmung, von einer negativen Bleiempfindlichkeit sprechen. Da die Zündverzüge von Methanol größer sind als die von Cyklohexan, wird aufgrund der Gegensätzlichkeit von Zünd- und Klopfverhalten die Tatsache der größeren Klopf- festigkeit des Methanols auch durch die Zündverzugsmessungen bestätigt.

Auf Blatt 2, Bild 7 und 8, sind die Zündverzugskurven des klopffesten Methyl-Butylketons mit denen des weniger klopffesten Diisobutylens verglichen. Auch hier ergeben die Zündverzüge die gleiche Beurteilung der Stoffe wie die Oktanzahlen. Die Blei- und Äthylnitrat-empfindlichkeit von Benzol zeigen Bild 9 und 10. Auch bei Benzol wird, wie wir bereits beim Methanol beobachtet haben, durch den Bleizusatz der Zündverzug wider erwarten verkleinert.

also weniger zündwillig sind. Auch Benzol weist wie Methanol eine negative Bleiempfindlichkeit auf. Danach läßt sich die Zündwilligkeit des Benzols auch durch das an sich als Klopfbremse bekannte Bleitetraäthyl verbessern. Die Wirkung ist allerdings erheblich geringer als beim Äthylnitrat. Bild 9 und 12 betreffen schließlich noch das Klopff- bzw. Zündverhalten des als klopffest bekannten Diisopropyläthers und des als Eichstoff bei der Oktanzahmessung verwendeten n-Heptans.

D. Auswertung der Ergebnisse.

Wie bereits eingangs erwähnt wurde, lassen sich beide, der Zündverzug im Dieselmotor und das Klopfen im Ottomotor, durch Kettenreaktionsvorgänge, deren Geschwindigkeit einem Faktor $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ proportional ist und für die die Beziehung

$$z_v = a \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

gilt, näherungsweise wiedergeben.

Darin bedeuten:

z_v den Zündverzug in ms,

T die absolute Temperatur bei Zündverzugsbeginn,

p den absoluten Druck bei Zündverzugsbeginn,

a , b und n vom Kraftstoff abhängige Zahlenwerte, die für bestimmte Temperaturbereiche als unveränderlich angesehen werden dürfen.

Bei den Werten a , b und n handelt es sich hier um empirische Größen, denen eine besondere physikalische Bedeutung nicht zukommt. Sie lassen sich aus Zündverzugsmessungen ermitteln.

Nimmt man zunächst unveränderten Druck an, so geht die Gleichung $z_v = a \frac{e^{b/T}}{p^n}$ in $z_v = \text{konst.} \cdot e^{b/T}$ über, oder logarithmiert in $z_v = b/T + \text{konst.}$ (Gleichung einer Geraden). Werden nun die $\ln z_v$, die im IG-Prüfdiesel bei dem konstanten Druck von $p = 26,4 \text{ ata}$ erhalten wurden, über den Quotienten $1/T$ aufgetragen, so müßten die Versuchspunkte, falls sie dem Gesetz vollständig gehorchen, auf einer Geraden liegen. Das dies nicht in allen Fällen zutrifft, dürfte darin seine Begründung haben, daß die Konstanten a , b und n , wie bereits eingangs erwähnt wurde, nur für abgegrenzte Druck- und Temperaturbereiche als unverändert angenommen werden dürfen. Aus der Neigung der Geraden läßt sich die Konstante b ermitteln.

die Versuchspunkte

Um zu zeigen, daß für die gewählten Druck- und Temperaturbereiche den angenommenen mathematischen Gesetzen folgen, wurden die Schaublätter 13 bis 24 auf Blatt 3 und 4 angefertigt. In diesen Schaublättern ist einmal der Zündverzugs in Abhängigkeit vom Kehrwert der Verdichtungstemperatur, zum anderen die Rechnungsgröße c in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck und zwar in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Danach liegen die Versuchspunkte recht genau auf den wiedergegebenen und der Auswertung zugrunde gelegten Geraden:

Auffällt noch, daß die Neigungen von unverbleitet und verbleitet Probe beispielsweise bei Isooktan (Bild 15) oder Benzol (Bild 21) in beiden Darstellungen die gleichen sind (Parallele), d.h. die b - und n -Werte werden vom Bleitetraäthylzusatz nicht beeinflusst. Lediglich der a -Wert wird ein anderer. (Abschnitt auf der Abszisse). ~~Die~~

verzüge so genau zu messen, wie die eindeutige Auswertung der Zündverzugsformel voraussetzt. Schon ganz geringe Abweichungen im Kurvenverlauf (beim Ausgleich der Versuchspunkte durch einen Kurvenzug) können sehr voneinander abweichende a -, b - und n -Werte ergeben. Beispielsweise führen geringe Änderungen des Exponenten n schon zur Verdoppelung der a -Werte. ~~Die rechnerisch aus den Zündverzugsmessungen nach obigem Verfahren ermittelten Konstanten a , b und n sind für die untersuchten zwölf Stoffe, vier Dieselmotortreibstoffe und acht Ottomotortreibstoffe in der folgenden Tabelle zusammengestellt.~~

Die rechnerisch aus den Zündverzugsmessungen nach obigem Verfahren ermittelten ~~rechnerisch~~ Konstanten a , b und n sind für die untersuchten Stoffe in der Tabelle 2 zusammengestellt.

+) Dieser Druck entspricht etwa einem Verdichtungsverhältnis von $1:22,8$

Tabelle 2.

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse.

S t o f f	Gleichung des Zündverzugs	$\frac{b/T}{p^k}$ Wert $\times 10^{-3}$	b-Wert n	a-Wert		Zündverzug x)	
				ohne Bleite-träthyl	mit Bleite-träthyl	ohne Bleite-träthyl	mit Bleite-träthyl
RCH-Cetan	$z_v = 2,25 \cdot \frac{1450/T}{p 1,0}$	235	1450	2,25	-	0,55	-
n-Heptan	$3,8 \cdot \frac{1760/T}{p 1,5}$	205	1400	3,8	6,5	0,78	1,33
Dieselmkraftstoff I/II	$15 \cdot \frac{1740/T}{p 1,5}$	66	1160	15	-	0,98	-
Bad.Gasöl	$11 \cdot \frac{1520/T}{p 1,45}$	59	1050	11	-	0,65	-
Cyklohexan	$52 \cdot \frac{2380/T}{p 1,95}$	34,5	1220	52	72	1,8	2,5
Diisobutylen	$62 \cdot \frac{3000/T}{p 2,26}$	27,5	1330	62	81	1,7	2,25
Benzol	$270 \cdot \frac{2270/T}{p 2,3}$	9,35	990	270	240	2,5	2,2
-Methylnaphthalin	$310 \cdot \frac{2290/T}{p 2,36}$	7,9	970	310	-	2,45	-
Isoktan	$280 \cdot \frac{1660/T}{p 2,15}$	7,2	770	280	380	2,02	2,75
Methanol	$440 \cdot \frac{2955/T}{p 2,68}$	6,3	100	440	410	2,8	2,
Diisopropylather	$515 \cdot \frac{2030/T}{p 2,4}$	5,0	845	515	700	2,6	3,5
Methyl-t-Butylketon	$820 \cdot \frac{3260/T}{p 3,0}$	3,28	1085	820	1100	2,7	3,6

Die Tabelle enthält ferner die Zündverzüge ohne und mit Bleitetraäthyl bei 26,4 ata Verdichtungsdruck und 795 K Verdichtungstemperatur. Schließlich wurden noch die $\frac{a}{p^n}$ -Werte und die $\frac{b}{T}$ -Werte gebildet. Die Stoffe wurden nach der Größe ihrer Zündverzüge geordnet. Die Reihe beginnt mit dem RCH-Cetan und endet mit dem Methanol, das einen Zündverzug von 2,8 ms, d.h. einen etwa fünfmal größeren Zündverzug als RCH-Cetan aufweist. Die kleinsten a, b und n-Werte besitzt ebenfalls das RCH-Cetan. Allgemein stellt man noch fest, daß weder die a, b und n-Werte noch die zusätzlich errechneten $\frac{a}{p^n}$ -Werte den Zündverzügen genau verhältniß sind.

best. $\frac{b}{T}$ - P^n
~~zündwillig, d.h. wenig klopfest.~~ Für den Dieselmotor dürften sich Stoffe eignen, die einen $\frac{a}{p^n}$ -Wert von etwa $60 \cdot 10^{-3}$ besitzen. Hochklopfest dagegen, etwa der Oktanzahl 100 entsprechend, sind Stoffe mit einem $\frac{a}{p^n}$ -Wert von unterhalb $10 \cdot 10^{-3}$.

Der Tabelle entnimmt man weiter für die untersuchten Paraffine etwa gleich große b- und n-Werte. Das isoparaffinische Isooktan zeigt dagegen bei gleichem b-Wert einen viel höheren n-Wert. Die Aromaten zeichnen sich durch erheblich größere b- und n-Werte aus. (Benzol und α -Methylnaphthalin). Die höchsten b-Werte besitzt das Diisobutylen, das Methanol und das Methyl-t-Butylketon. Es ist anzunehmen, daß ~~andere~~ ^{die} Stoffgruppen, wie Olefine, Ketone usw. sich ebenfalls durch annähernd gleich hohe b- und n-Werte voneinander unterscheiden.

B. Kritik der Ergebnisse.

Eine Gegenüberstellung der am I.G.-Prüfdiesel gefundenen Zündverzüge mit anderen Untersuchungen über die Zündwilligkeit der Kraftstoffe bringt Blatt 3 und 4. Wolfer hat aufgrund von Bombenversuchen mit Dieselöl eine Formel für den Zündverzug im Dieselmotor abgeleitet, die folgendermaßen lautet:

$$z_v = 0,44 \frac{a}{p^{1,12}} \frac{4560}{T}$$
 In Bild 13 und 15 sind die nach der Wolfer-Formel berechneten Zündverzugskurven in Abhängigkeit von dem Verdichtungsdruck und von der Verdichtungstemperatur aufgetragen, ferner die am I.G.-Prüfdiesel für RCH-Cetan, Bad.Gasöl, Dieselmotorkraftstoff IV/II und α -Methylnaphthalin erhaltenen Zündverzugskurven. Danach ergibt die Wolfer-Formel viel zu große Zündverzüge, sie decken sich etwa mit den am I.G.-Prüfdiesel für α -Methylnaphthalin gefundenen. Die Begründung dürfte darin liegen, daß Wolfer die Beziehung aus Bombenversuchen hergeleitet hat, die bekanntlich erheblich höhere Zündverzüge liefern als der Motor.

Daß die am IG-Prüfdiesel gemessenen Zündverzögerungen sich größenordnungsmäßig mit denen bei anderen Motorversuchen beobachteten decken, beweist Bild 27, wo Versuche der DVL an einem Dieselmotor mit direkter Einspritzung, mit Vorkammer und mit Lanova-Luftspeicher, in Abhängigkeit von der Luftdichte, aufgetragen sind. Bei den drei Dieselversuchen ergaben sich etwa gleich große Zündverzögerungen, sodaß sich die Zündverzögerungen durch einen einzigen Kurvenzug ausgleichen lassen. Leider ist die Cetanzahl der bei den Versuchen verwendeten Dieselkraftstoffe nicht bekannt, sodaß ein Vergleich mit den IG-Prüfdieselversuchen nicht ohne weiteres möglich ist, es läßt sich lediglich zeigen, daß die DVL-Zündverzögerungskurve über der RCH-Cetanzahl liegt und bei einer Luftdichte über 16 kg/m^3 etwa mit der von Bad. Gasöl am IG-Prüfdiesel gefundenen deckt.

stark auch im Dieselmotor der Zündverzug von den untersuchten Kraftstoffen abhängt. Daß die in Bomben gefundenen Zündverzögerungen ein Mehrfaches von den im Motor gemessenen darstellen, geht auch aus Bild 16 hervor, wo für RCH-Cetan und -Methylnaphthalin Bombenversuche von R. Müller mit den I.G.-Prüfdiesel-ergebnissen zusammen dargestellt sind.

Sie beweisen, daß man sich bei Zündverzögerungsmessungen keinesfalls auf Bombenversuche beschränken darf.

Während die auf Blatt 5 zusammengestellten Ergebnisse die beiden Eichstoffe für Cetanzahlmessung und zwei Dieselkraftstoffe betreffen, enthält Blatt 6 eine Gegenüberstellung der Stoffe, die man aufgrund ihres Klopfverhaltens mehr im Ottomotor verwenden dürfte.

am I.G.-Prüfdiesel beobachtete Zündverzögerungskurve mit n-Heptan zwischen den beiden Kurven von Lonn liegen. Tatsächlich sind die Zündverzögerungen des I.G.-Prüfdiesels erheblich geringer. Ähnliche Ergebnisse entnimmt man Blatt 16, wo für ein Bleibenzin (Oktanzahl und Bleigehalt waren leider nicht bekannt) die Zündverzögerungskurve zusammen mit der von verbleitem Diisobutylen am I.-G.-Prüfdiesel ermittelten dargestellt ist. Auch hier findet man im Motor wieder erheblich geringere Zündverzögerungen.

Die schon mehrfach beobachtete Tatsache, daß die Bleiempfindlichkeit bei Zündverzögerungsmessungen und auch bei der Prüfung des Klopfverhaltens im aufgeladenen Ottomotor durch einen kraftstoffabhängigen, annähernd konstanten Faktor ausgedrückt werden kann, wurde sowohl durch die Zündverzögerungsmessungen am I.-G.-Prüfdiesel als auch durch Überladeversuche am I.-G.-Versuchsmotor K, eines Kleinüberlademotor, bestätigt.

In Bild 19 wurde das Verhältnis aus den Zündverzögerungen eines verbleiten und unverbleiten Benzins nach Untersuchungen von Lonn gebildet. Danach ist der Faktor für die Bleiempfindlichkeit zwar von dem Verdichtungsdruck, aber nicht

29421

- +) Soll die Zündverzögerungsformel auch noch die Cetanzahl enthalten, so kann man nach Wolfer schreiben $\tau_v = \text{konst.} \cdot \frac{E/RT}{CaZ}$, worin CaZ die Cetanzahl bedeutet. Da der Zündverzug nicht nur ein Druck- und Temperaturproblem darstellt, sondern auch noch von anderen Faktoren, beispielsweise durch das Luftverhältnis, durch das Vorhandensein inärter Gase, oder durch die Mantelbeschaffenheit des Verbrennungsraumes und andere beeinflusst wird, hat es wenig Sinn, Cetanzahlen danach zu bestimmen.

von der Verdichtungs-temperatur abhängig. Für einen Verdichtungsdruck von 21,31 und 41 ata wurden Durchschnittswerte von 1,2; 1,4 und 1,7 für den Bleiempfindlichkeitsfaktor erhalten.

Bild 20, 21 und 22 gibt Klopfgrenzwerte bei einem bestimmten Luftverhältnis in Abhängigkeit von der Ladelufttemperatur für eine Anzahl von verbleiten und unverbleiten Kraftstoffen wieder. Für die an I.G.-Prüfdiesel und am I.G.-Versuchsmotor K geprüften Stoffe wurden folgende Faktoren für die Bleiempfindlichkeit gefunden.

Tabelle 3. Zusammenstellung der Werte für die Bleiempfindlichkeit.

Stoff	Werte der Bleiempfindlichkeit	
	1. Nach dem Überladederfahren am IG-Versuchsmotor K	2. Nach dem Zündverzugsverfahren an IG-Prüfdiesel.
Diisobutylen	1,45	1,31
Cyklohexan	1,85	1,4
Benzol	1,28	0,89
Methanol	1,27	0,42
Isoktan	1,61	1,36
Diisopropyläther	1,36	1,35

Es fällt auf, daß nach beiden Verfahren Benzol und Methanol die geringste Bleiempfindlichkeit aufweisen. Außerdem ist in beiden Fällen die Bleiempfindlichkeit von Cyklohexan die größte.

Es wäre schließlich noch darauf hinzuweisen, daß, während bei Überladung die Werte in jedem Fall über 1 liegen, bei den Zündverzugsmessungen der Bleiempfindlichkeitswert auch kleiner als 1 sein kann, dies bedeutet aber, daß durch den Zusatz von Bleitetraäthyl die Zündverzüge bei Benzol und Methanol nicht, wie erwartet, größer, sondern kleiner werden.

Man kann danach für einen verbleiten Kraftstoff folgende Zündverzugsformeln schreiben:

$$z_{\text{verbleit}} = z_{\text{unverbleit}} \cdot f \cdot \frac{b/T}{p^n}$$

worin f den Bleiempfindlichkeitsfaktor darstellt.

In Bild 35 auf Blatt 5 wurden die Zündverzüge und die Rechnungswerte $\frac{b/T}{p^n}$ über der Oktanzahl aufgetragen. Aufgrund der Gegensätzlichkeit von Klopfverhalten und Zündwilligkeit nehmen mit wachsender Oktanzahl die Zündverzüge zu. Die Größe des Zündverzugs kann somit auch ein Maß für das Klopfverhalten eines Stoffes darstellen.

Umgekehrt ergeben Stoffe mit hoher Oktanzahl geringe $\frac{b/T}{p^n}$ Werte. Beispielsweise entspricht einer Motorktanzahl von 100 ein $\frac{b/T}{p^n}$ Wert von etwa 10×10^{-3} .

bedingungen nicht möglich. Die Oktanzahlbestimmung wird als Einpunktverfahren und nur bei einem ganz bestimmten Druck bzw. bei einer bestimmten Temperatur durchgeführt. Im Gegensatz dazu erfaßt die Zündverzugsmessung einen ausgedehnten Druck- bzw. Temperaturbereich. Weiter ist bekannt, daß für die Beurteilung des Kraftstoff-Klopffverhaltens eine einzige Größe, wie beispielsweise die Oktanzahl, nicht ausreicht, und es wurde in der Literatur auch schon mehrfach darauf hingewiesen. Nach F.A.F. Schmidt sind für eine eindeutige Beurteilung des Kraftstoffklopffverhaltens drei, mindestens jedoch zwei Größen erforderlich. Dabei kann allerdings die Oktanzahl Berücksichtigung finden. Als weitere Beurteilungsgröße wurde der $\frac{b}{n}$ -Wert vorgeschlagen. Nach den Untersuchungen am I.G.-Prüfdiesel scheint jedoch der Faktor $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ geeigneter zu sein, denn wie Bild 24 zeigt, können beispielsweise einem $\frac{b}{n}$ -Wert von 12×10^2 zwei stark voneinander abweichende $\frac{e^{b/T}}{p^n}$ -Werte, nämlich 35 und 65×10^{-3} entsprechen. Dieser Faktor erfaßt zudem noch die Druck- bzw. Temperaturabhängigkeit beim Ablauf der Kettenreaktion, wie stark der Faktor von den Größen b bzw. n beeinflusst wird, zeigen die beiden Bilder 25 und 26, wo in Abhängigkeit vom Druck die verhältnißmäßige Zunahme des Wertes p^n und in Abhängigkeit von der Temperatur die des Wertes $e^{b/T}$ aufgetragen wurde. Das

erhöht man beispielsweise bei 25 ata Druck den Wert n auf das dreifache (von n = 1 auf n = 3) bzw. bei 800°K den Wert e um den gleichen Betrag (von b = 1000 auf b = 3000), so ist im ersten Fall der Wert p^n auf das 2,8-fache im anderen Fall der Wert $e^{b/T}$ auf das 1,8-fache des Grundwertes angewachsen. Die schnellere Zunahme des p^n -Wertes, dem $e^{b/T}$ -Wert gegenüber ist damit unverkennbar.

der Zündverzug nach Semenoff auch durch die Funktion

$$z_v = \text{konst.} \cdot \frac{e^{E/RT}}{p^n}$$

29423

darstellen. Darin bedeutet E die Aktivierungsenergie und R die Gaskonstante. Die Aktivierungsenergie pflegt man in kcal/Mol anzugeben, die Gaskonstante R ist dabei mit 2 cal einzusetzen. Stellt man der obigen Beziehung die Formel

$$z_v = a \cdot \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

gegenüber, so ergibt sich durch Vergleich, daß der Wert b dem Quotienten E/R entsprechen muß. Damit wird es möglich, die scheinbare Aktivierungsenergie E auch für die im I.G.-Prüfdiesel untersuchten Kraftstoffe zu bestimmen. In der folgenden Tabelle sind die nach der Formel $E = b \cdot R$ berechneten scheinbaren

Aktivierungsenergien der am I.G.-Prüfdiesel untersuchten Kraftstoffe angegeben. Man darf nur von einer scheinbaren Aktivierungsenergie sprechen, da der Wert E der aus der Zündverzugsleichung mit Hilfe von empirischen Konstanten ermittelt wurde, nicht mehr der Aktivierungsenergie im üblichen Sinne entspricht.

Zusammenfassung. Zündverzug und Bewertung der Kraftstoffe. Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für Diesel- und Otto-Kraftstoffe.

- 11) O. Widmaier. Zündverzugsmessungen an Diesel- und Otto-Kraftstoffen. Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 63.

Folgende *Werte* *in* *der* *folgenden* *Tabelle*

	Scheinbare Aktivierungsenergie E kcal/Mol	Summenformel	Strukturformel	Verdampfungswärme kcal/Mol.
Cetan	2,9	$C_{16}H_{34}$	$CH_3-CH_2 \dots CH_2CH_3$	12,2
Heptan	3,4	C_7H_{16}	$CH_3-CH_2 \dots CH_2CH_3$	7,4
DK X/II	3,5			-
Bad.Gasöl	3,0			-
Isooktan	3,3	C_8H_{18}	$CH_3-C(CH_3)_2-CH_2-CH(CH_3)-CH_3$	8,8
Benzol	4,5	C_6H_6		7,4
α -Methylnaphthalin	4,6	$C_{11}H_{10}$		-
Cyklohexan	4,8	C_6H_{12}		7,3
Diisopropyläther	4,1	$C_6H_{14}O$	$CH_3-CH_2-O-CH(CH_3)_2$	7
Methanol	5,9	CH_4O	CH_3-OH	8,5
Methyl-t-Butylketon	6,5	$C_6H_{12}O$	$CH_3-C(CH_3)_2-CO-CH_3$	-
Diisobutylen	6,0	C_8H_{16}	$CH_3-C(CH_3)=CH-CH_2-CH(CH_3)-CH_3$	8,8

Allgemein zeigen zunächst die paraffinischen bzw. isoparaffinischen Stoffe etwa die gleiche und von sämtlichen untersuchten Kraftstoffen die geringsten Werte für die scheinbare Aktivierungsenergie. Auch bei den Aromaten macht man die Feststellung, daß sie annähernd die gleichen Werte für die scheinbare Aktivierungsenergie besitzen. Allerdings sind sie größer als bei den paraffinischen bzw. isoparaffinischen. Das würde bedeuten, daß zur Aufspaltung der Ringkohlenwasserstoffe eine höhere scheinbare Aktivierungsenergie notwendig ist. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich für die Sauerstoffträger, dem Methyl-t-Butylketon, dem Methanol und dem Diisopropyläther. Ferner fällt auf, daß auch Diisobutylen eine verhältnismäßig hohe scheinbare Aktivierungsenergie hat, was auf die Doppelbindung zurückgeführt werden dürfte.

Es müßte noch eine größere Anzahl von Stoffen einer bestimmten Gruppe beispielsweise von der der Olefine, der Alkohole usw. untersucht werden, um die bei den Paraffinen und Aromaten gemachte Feststellung der annähernd gleichen Aktivierungsenergie auch für die anderen Gruppen zu beweisen. Allgemein beobachtet man, daß die aus den Zündversugsmessungen an I.G.-Prüfdiesel ermittelten scheinbaren Aktivierungsenergien erheblich kleiner sind als bei Bombenversuchen, wo man auf Werte von 30 - 50 kcal/Mol kommt. Wolfer erhält allerdings aufgrund seiner für den Zündversug am Dieselmotor abgeleiteten Beziehung auch nur einen Wert von etwa 9 kcal/Mol für E.

Hierzu ist zu sagen, daß der Wert für E sehr unterschiedlich sein kann, je nachdem, in welchem Temperaturbereich man sich befindet. Wählt man zudem das Temperaturintervall zu groß, so gehorcht der gemessene Zündversug dem Gesetz

$$z_v = a \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

nicht mehr, d.h., man darf den b-Wert nicht mehr als konstant annehmen. ¹¹⁾

Der Vollständigkeit halber sind in der Tabelle auch die Verdampfungswärmen der Stoffe angegeben. Hierzu stellt man fest, daß die Verdampfungswärmen bei sämtlichen untersuchten Stoffen nicht unerheblich höher sind als die E-Werte, bei Cetan beträgt sie etwa das fünffache, bei Diisobutylen dagegen nur etwa das 1,3-fache der scheinbaren Aktivierungsenergie. Streng genommen gelten die aus den Zündversugsmessungen ermittelten E-Werte nur für gasförmige Kraftstoff-Luftgemische ^{12) 13)} während bei den Versuchen an I.G.-Prüfdiesel der Kraftstoff flüssig ¹⁴⁾ eingebracht wurde. Andererseits ist nach Versuchen von Wenzel der physikalische Zündversug gegenüber dem chemischen Zündversug klein.

Sehr anschaulich läßt sich noch das Zünd- bzw. Klopfverhalten der Kraftstoffe durch die räumlichen Darstellungen auf Blatt 6 wiedergeben. Logarithmiert man nämlich die Gleichung für den Zündversug,

$$z_v = a \frac{e^{b/T}}{p^n}$$

so erhält man

$$\ln z_v = \ln a + b/T - n \ln p.$$

29425

- 11) F.A.F. Schmidt. Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündversug und Klopfvorgang. VDI-Forschungsheft 392, S.1.
 12) F.A.F. Schmidt. Beeinflussung von Gemischbildung und Zündungsvergängen im Verbrennungsmotor. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung 1939, Heft 9.

-16-

- 14) M. Scheuermeyer und H. Steigerwald. Die Messung des Zündverzugs verdichteter Kraftstoff-Luftgemische zur Untersuchung der Klopfneigung. MTZ 8/9, Sept. 1943.

Dies ist aber die Gleichung für die Ebene im Raum; werden nun je zwei von den drei Veränderlichen $\ln z_v$, $\ln p$ und $1/T$ gleich Null gesetzt, so erhält man die Schnitte der räumlichen Ebene mit den Koordinatenebenen, dreieckige Flächen, die man als Zündverzugsdreiecke bezeichnen könnte. Sie geben die Abhängigkeit des Zündverzugs von dem Verdichtungsdruck und von der Verdichtungs-temperatur wieder. Den Flächeninhalt der Dreiecke könnte man gleichfalls als Maß für die Zündwilligkeit bzw. Klopfestigkeit der Stoffe heransiehen. Sehr zündwillige Kraftstoffe, wie Cetan oder Heptan, würden danach einen geringen Flächeninhalt aufweisen.

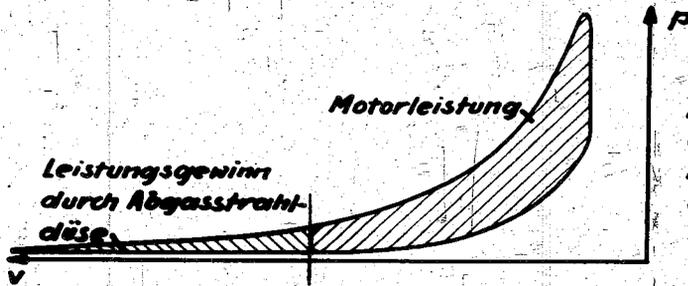


Bild 1:
pv-Diagramm
eines Flugmotors
mit Abgasstrahl-
düse.

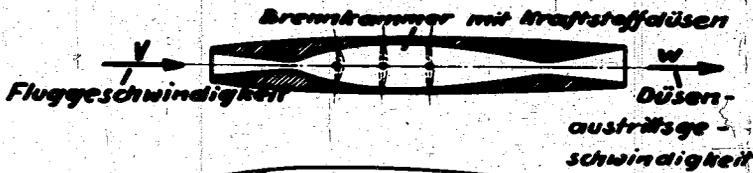


Bild 2:
Schema eines
Wärmekraft-
Rückstößers

- a) Lufteinlass
- b) Verdichter
- c) Antriebsmotor
- d) Brennkammer
- e) Strahldüse

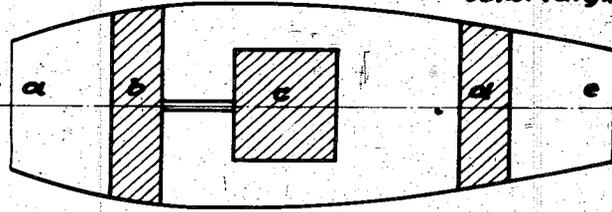


Bild 3:
Strahltriebwerk

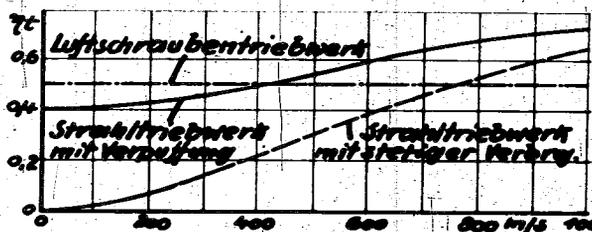


Bild 4: Therm. Wirkungsgrad η über Fluggeschwindigkeit v

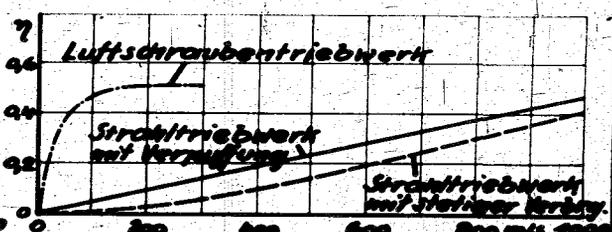


Bild 5: Gesamtwirkungsgrad γ über Fluggeschwindigkeit v

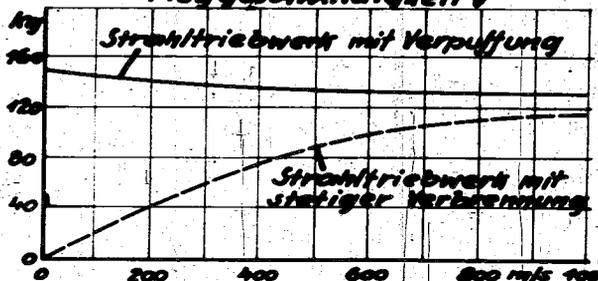


Bild 6: Vortrieb in kg (Schub) über Fluggeschwindigkeit v

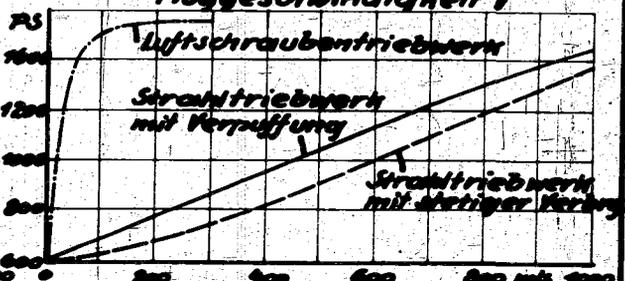


Bild 7: Nutzleistung in PS über Fluggeschwindigkeit v

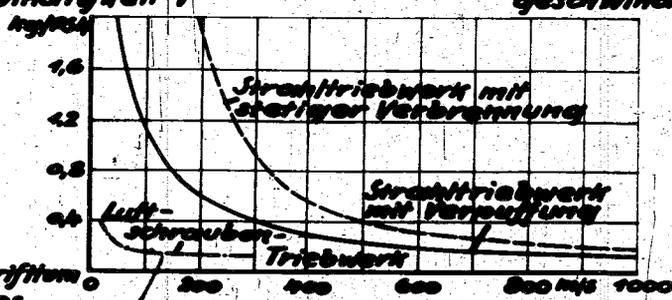


Bild 8: Spez. Verbrauch in kg/PS h über Fluggeschwindigkeit v

Aus: Luftfahrt-Schriften
des Auslandes
1939, Bd. 5, Nr. 1/2

C 22427

Techn. P. i. t.
18. MAI 1944
Erl.



Reiseberichte-Nr 9/0786/0006

DAIMLER-BENZ AKTIENGESELLSCHAFT ZENTRALE STUTTGART-UNTERTÖRKHEIM

DRAHTWORT: Daimlerbenz / FERNSPRECHER: 301 41-44, 302 41-48, 304 64, 311 41-48 / FERNSCHREIBER: 06 912

DAIMLER-BENZ AKTIENGESELLSCHAFT, STUTTGART-UNTERTÖRKHEIM

Einschreiben I

Herrn

Professor Dr. W i l k e
i. Fa. I. G. Farbenindustrie
Aktiengesellschaft

Ludwigshafen a. Rhein

Ihre Zeichen Ihre Nachricht vom Unsere Zeichen Hausruf Nr. **STUTTGART-UNTERTÖRKHEIM**
TA/TPr 2.5. 60 KB Dr. Ro/Fr Mercedesstraße
Op 471 Pe Nr. 11258/44 16.5.44
Betreff

Wir haben auf Grund Ihres obigen Schreibens überprüft, welche Möglichkeiten gegeben sind, um Ihre Anforderungen mit vorhandenen Ladern zu befriedigen. Das Ergebnis unserer Untersuchungen können Sie aus dem beigefügten Kurvenblatt RV 391 entnehmen und zwar handelt es hierbei um unseren serienmässig gültigen Lader des Baumusters DB 603 A, der bei einer Drehzahl von 13 500 U/Min und einem Luftdurchsatz von 1,5 kg einen Ladedruck von 1,4 ata erzeugt. Durch geringfügige Steigerung der Drehzahl können sowohl Ladefluchtdurchsatz als auch Ladedruck noch in erheblicher Grenze gesteigert werden.

Auf Grund dieses Ergebnisses schlagen wir Ihnen daher vor, für Ihre Anlage zwei Gebläse dieser Bauweise zu verwenden und sie auf eine gemeinsame Leitung arbeiten zu lassen. Die

333622

29428

KONTEN: Deutsche Bank Berlin, Stuttgart, Mannheim / Commerzbank A.-G., Filiale Stuttgart
Dresdner Bank, Filiale Stuttgart / Bank der Deutschen Arbeit A.-G., Niederlassung Stuttgart / Reichsbank-Giro-Konto Stuttgart Nr 8/88 / Sächs. Girokassa Stuttgart / POSTSCHECK: Stuttgart Nr 470

D. B.
W60

Gebälseleistung des DB 603A Laders

Versuch-Nr.

Seiten-Nr.

RV 391

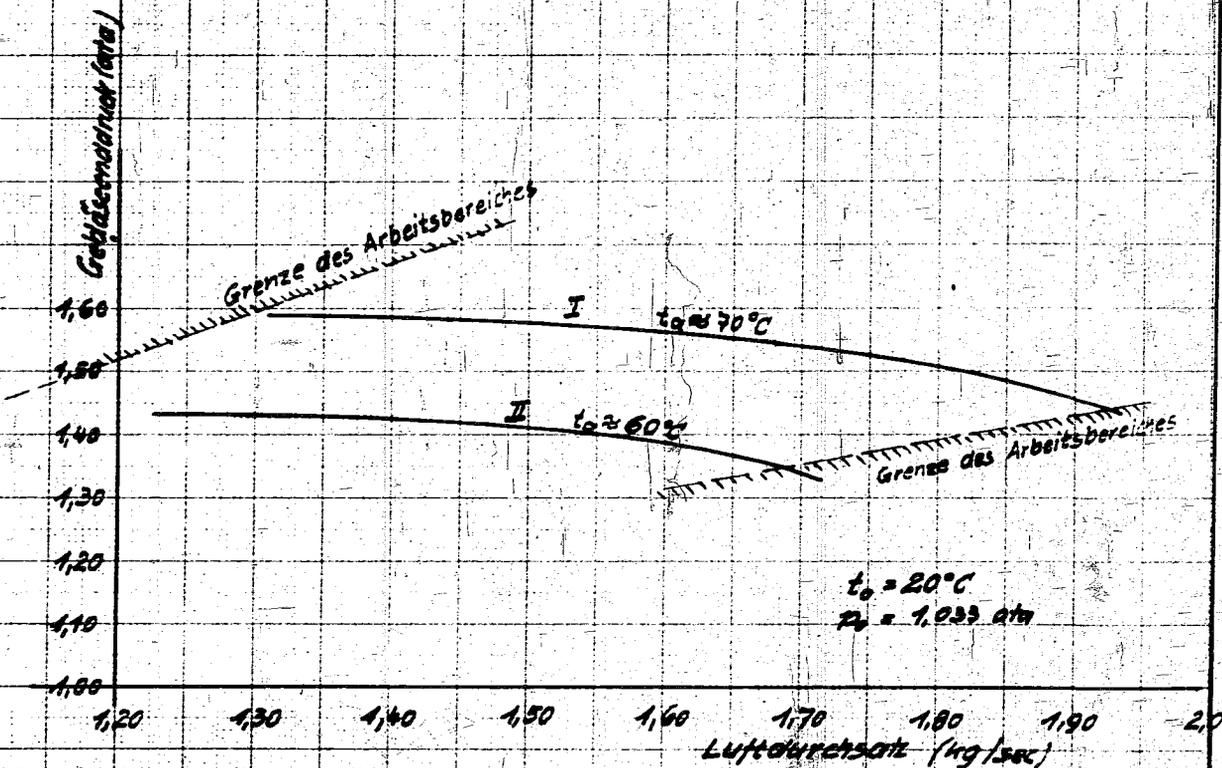
Blatt-Nr.

Tag:

Gez.:

Ges.:

Gednd.:



I Drehzahl der Gebläsewelle $n_0 = 15\,500 \text{ U/min}$
 II " " " " " $n_0 = 13\,500 \text{ U/min}$

max. Wellenleistung für I $N_L = 130 \text{ PS}$
 " " " II $N_L = 90 \text{ PS}$

29429

12.5.44 Netz

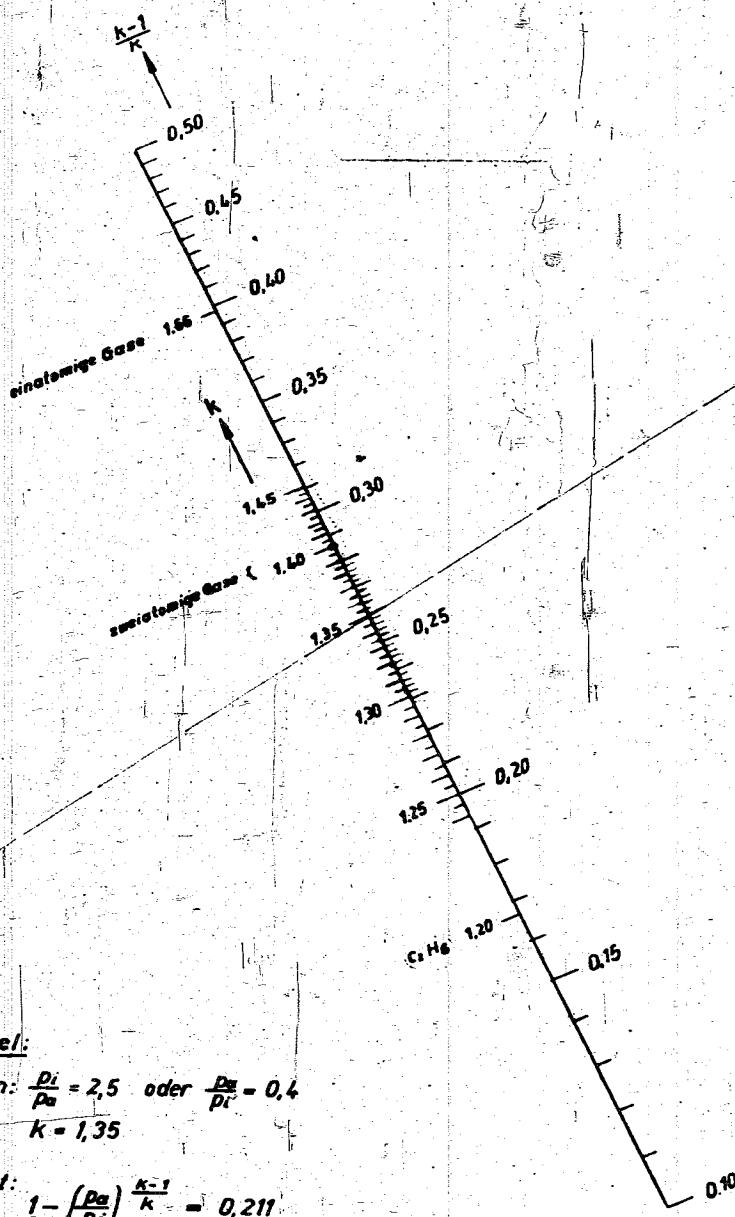
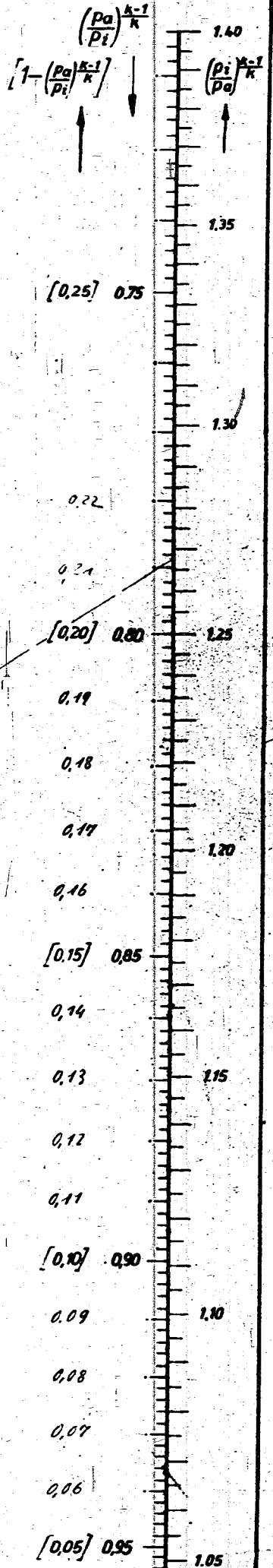
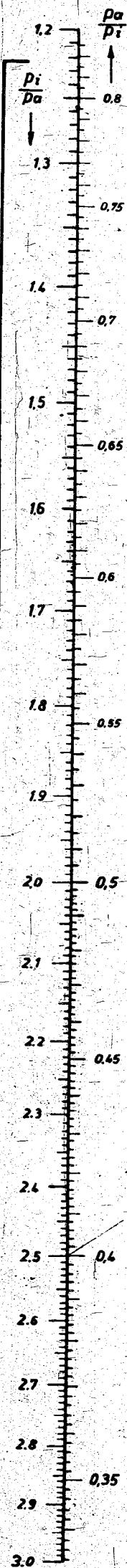
Fluchtlinientafel zur Ermittlung des Ausdruckes:

$$1 - \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Als Zwischenergebnisse können noch folgende Werte abgelesen werden:

$$\left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} ; \left(\frac{p_i}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} ; \frac{p_i}{p_a} = f\left(\frac{p_a}{p_i}\right)$$

$$\frac{k-1}{k} = f(k)$$



Beispiel:

Gegeben: $\frac{p_i}{p_a} = 2,5$ oder $\frac{p_a}{p_i} = 0,4$
 $k = 1,35$

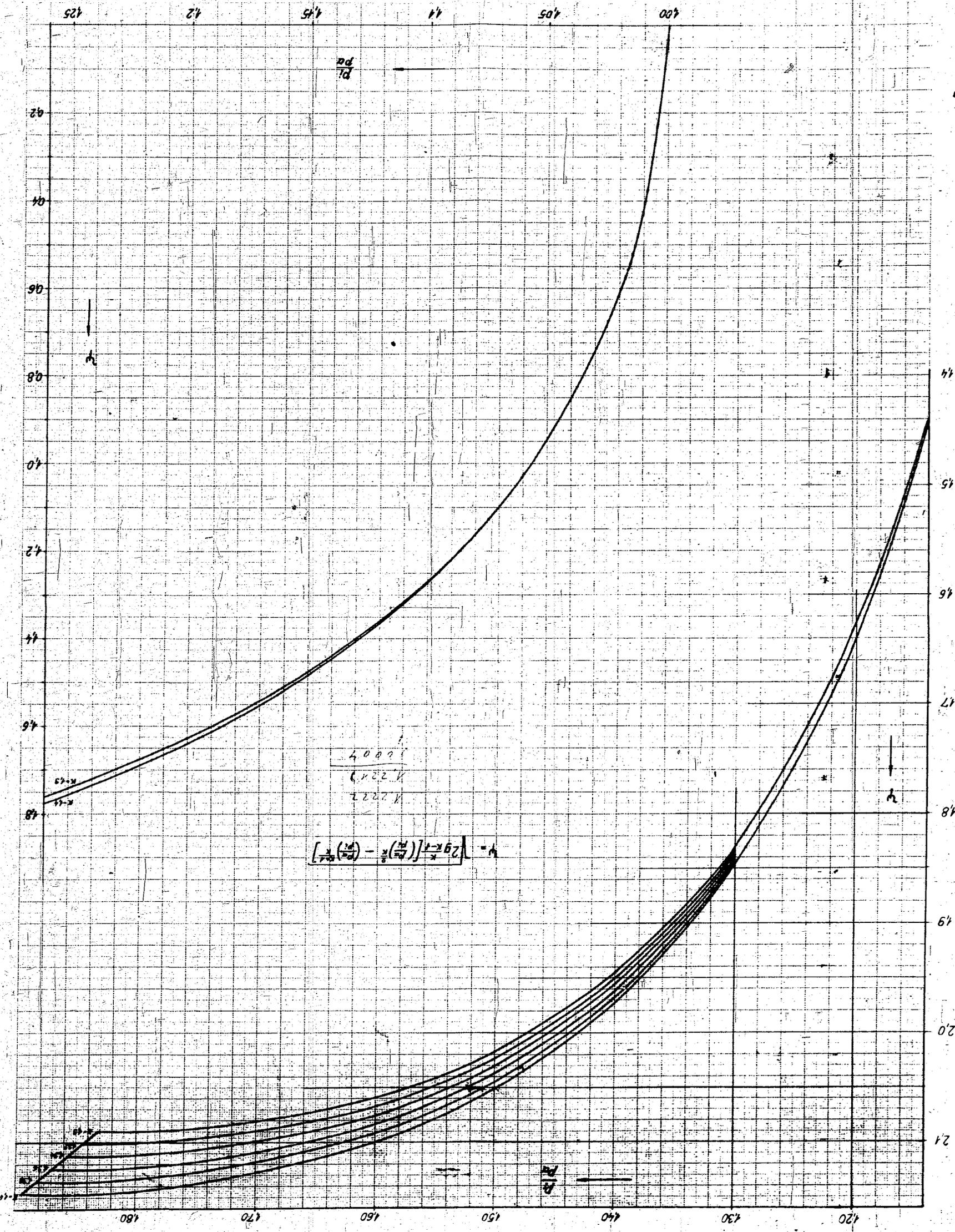
Gesucht: $1 - \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 0,211$

Zwischenergebnisse: $\left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 0,789$

$\left(\frac{p_i}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1,268$

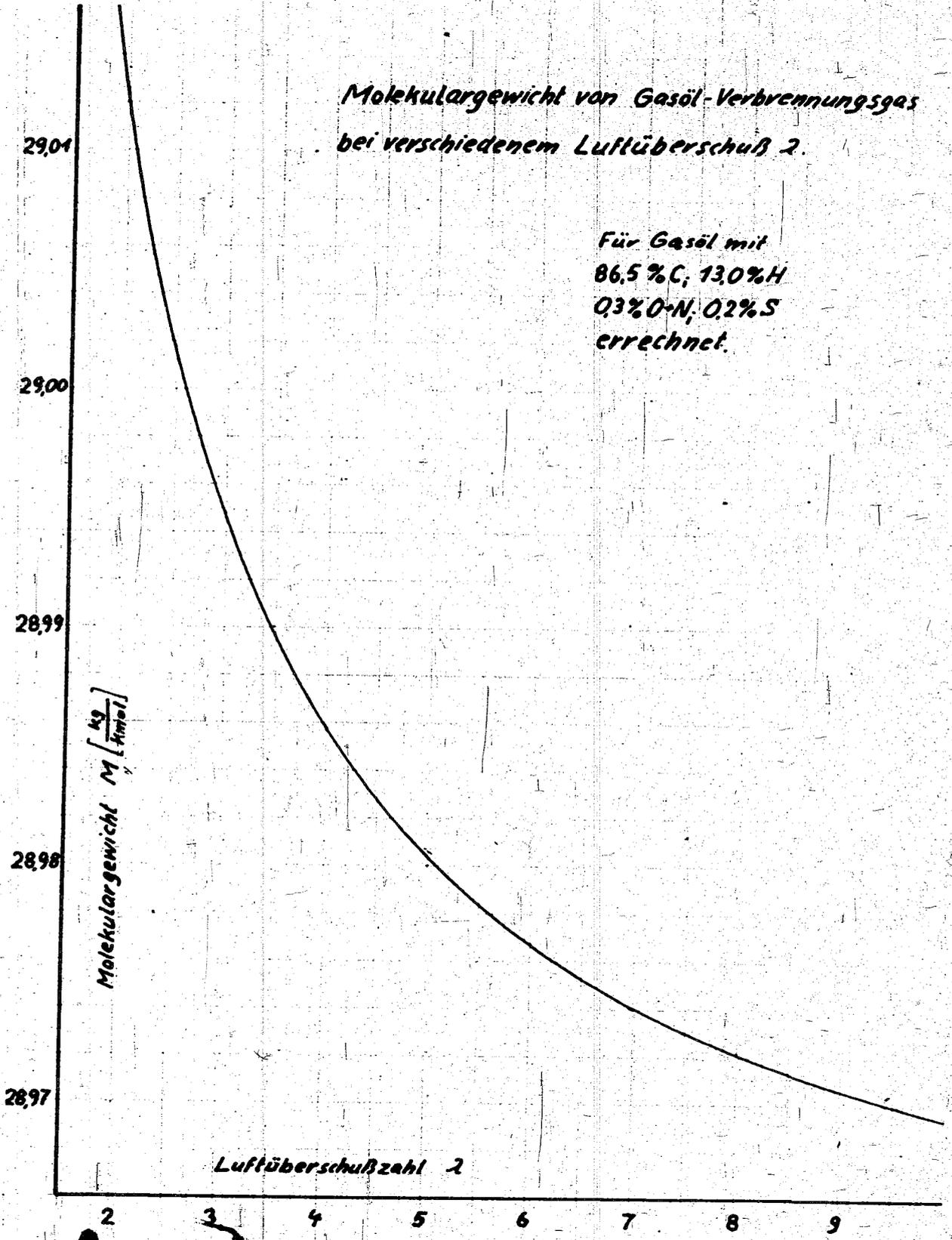
$\frac{k-1}{k} = 0,259$

29430

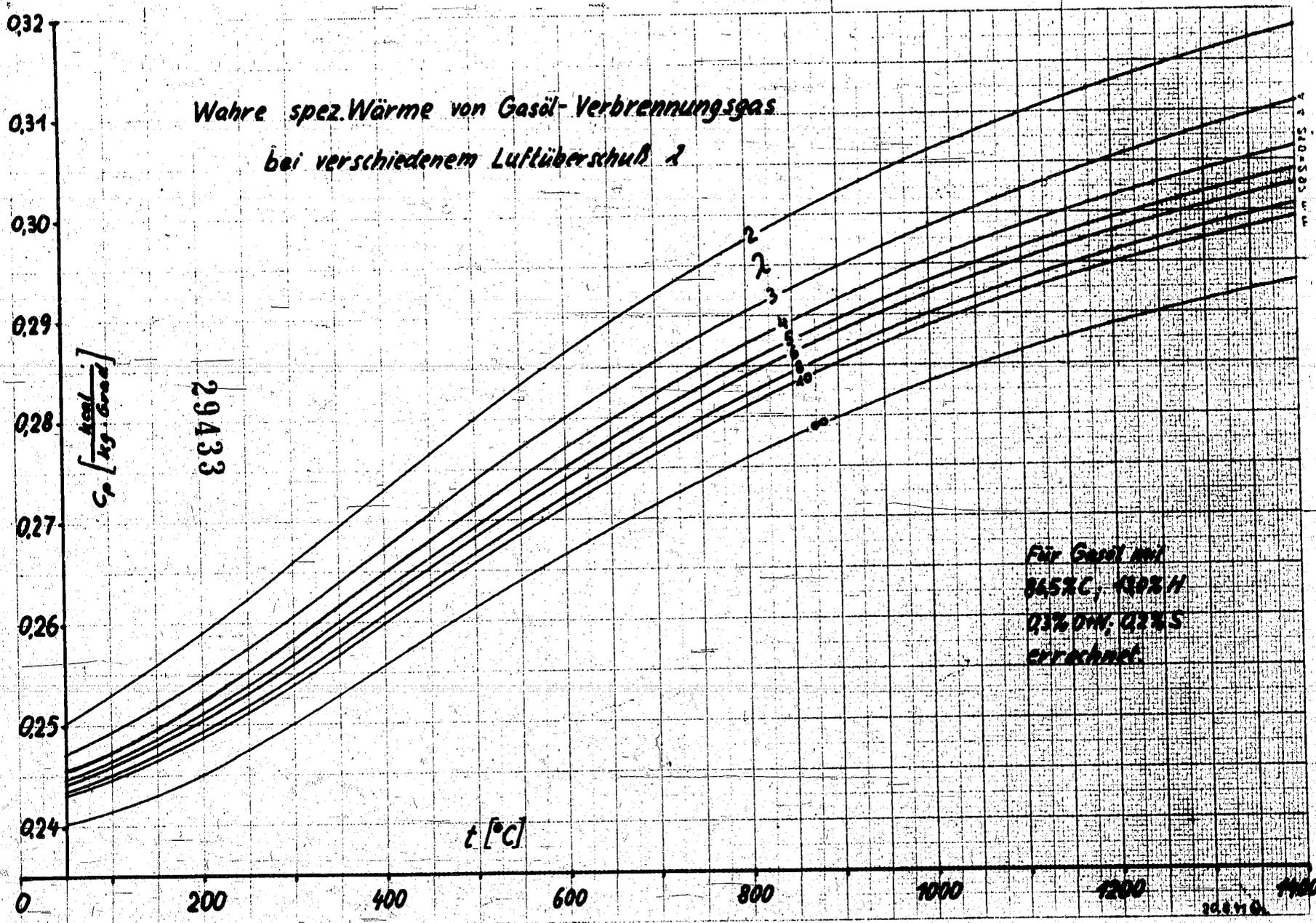


Molekulargewicht von Gasöl-Verbrennungsgas
bei verschiedenem Luftüberschuß λ .

Für Gasöl mit
86,5% C, 13,0% H
0,3% O, N, 0,2% S
errechnet.

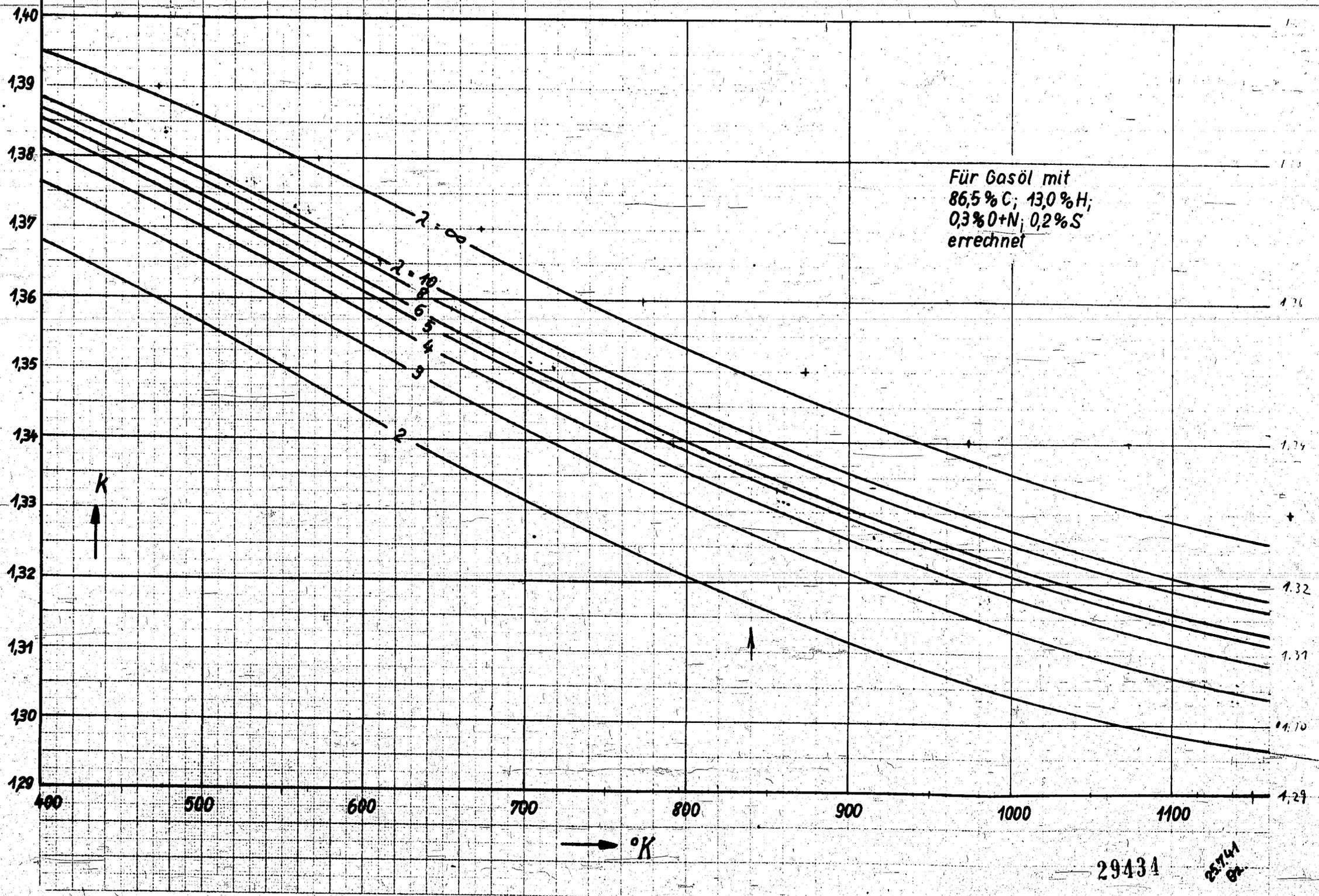


Wahre spez. Wärme von Gasöl-Verbrennungsgas
bei verschiedenem Luftüberschuß λ



Für Gasöl mit
845°C, 130% H
0,3% O₂, 0,3% S
errechnet

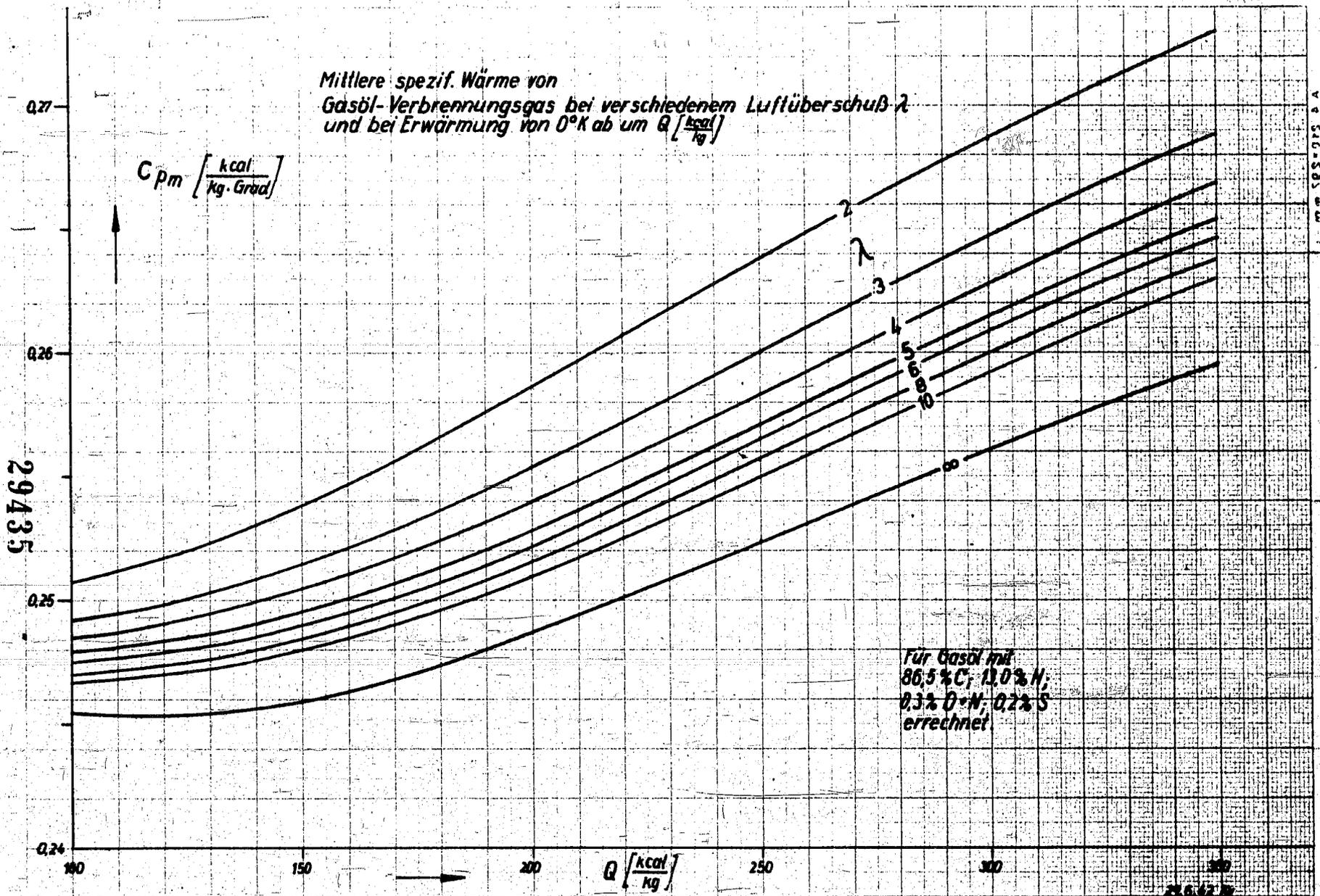
Wahres k von Gasöl-Verbrennungsgas bei verschiedenem Luftüberschuss λ



29434

25741
82

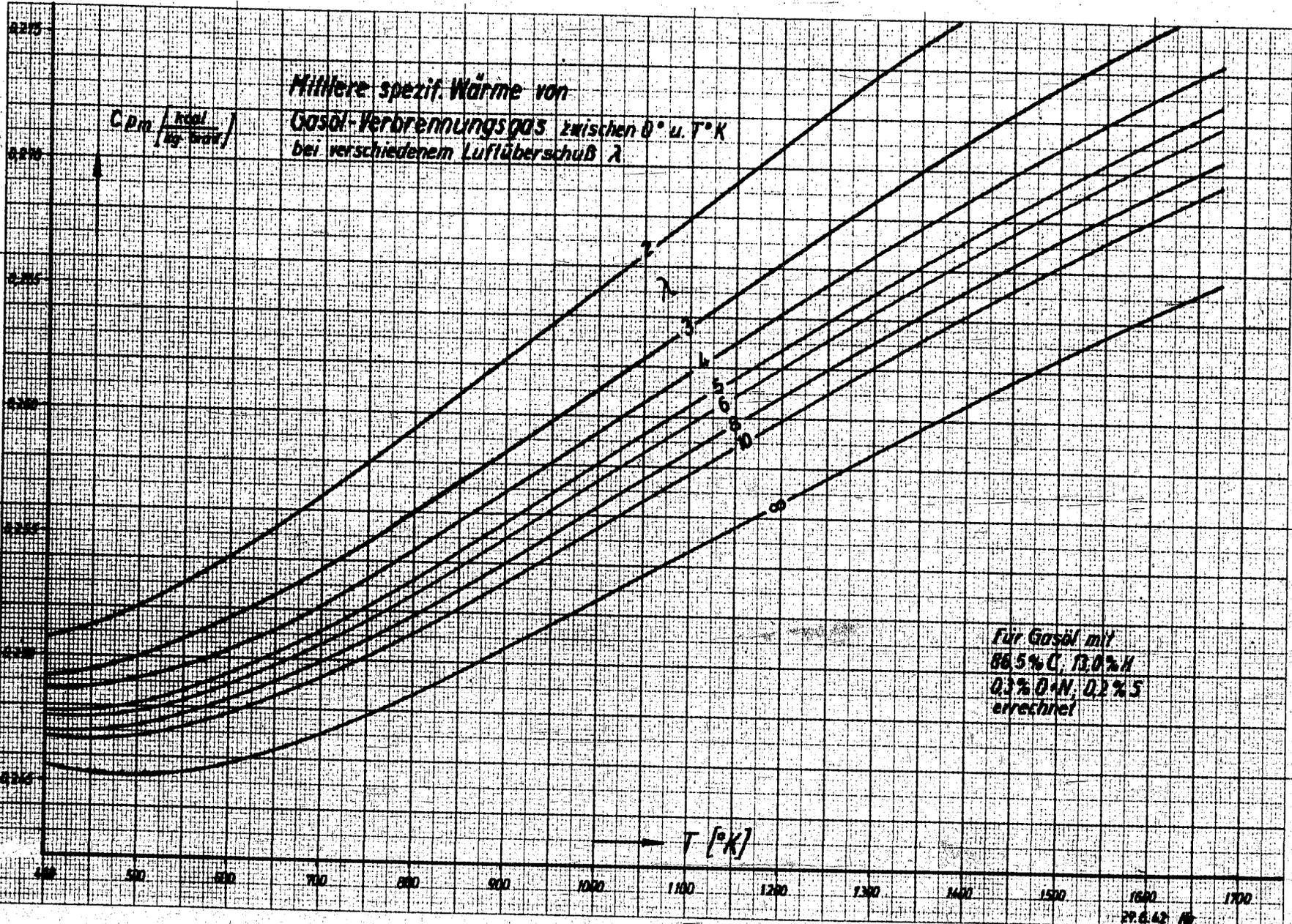
Mittlere spezif. Wärme von
 Gasöl-Verbrennungsgas bei verschiedenem Luftüberschuß λ
 und bei Erwärmung von 0°K ab um $Q \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$



29435

m m 505-915 8 A

29436



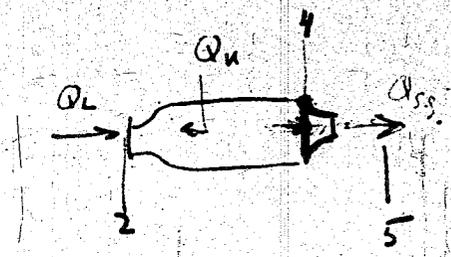
Q

$$\eta_A = \frac{Q_{VE, \text{Exp. mott}} - Q_L}{Q_H}$$

$$Q_L = c_{pm} T_L$$

$$Q_H = \frac{G_H \cdot H_H}{G_H + G_L}$$

$$Q_{VE, \text{Exp. mott}} = c_{pm} T_{VE, \text{Exp. mott}}$$



$$Q_{SS} = c_p A u \left[R T_{SS} \left[1 - \left(\frac{P_5}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + \frac{u^2}{2g} \right]$$

$$T_{45} = T_{VE} = \frac{\frac{P_4}{P_2} - \frac{u^2}{2g}}{\frac{P_5}{P_2} - \frac{u^2}{2g}}$$

$$Q_{SS} = \dots$$

0.267

0.66 = 0.17

Wärmerückgewinnungsgrad

Parameter	Value
η_A	32%
η_B	15%

c_{pm}

$K = f(T_{SS})$

$1 - \frac{P_5}{P_2}$

29437

Handwritten notes at the bottom right corner.

Wertigkeit A = $\frac{A \text{ vor Expansion} - A_0}{A_0}$

(3)

$A_{v. E}$ (per Expansion, je Maß, der Gesamtumfang
 paritätisch)

A_L Gesamtheit (paritätisch)

A_H Kraftleistung

$A_L = \text{Gru. T}_L$

$A_H = \frac{G_H \cdot U_H}{G_H + G_L}$ (paritätisch)

$A_{v. E} = \text{Gru. T}_{v. E}$ (per Expansion, je Maß der Gesamtumfang)

$A_{S \text{ gemessen}} = \text{Drehm. je Taktverhältnis}$

$A_{S \text{ gemessen}} = \text{Ergebnis bei paritätischer Gesamtumfang +
 bischer Gesamtumfang} \left(\frac{A_{v. E}^2}{2g} \right)$

Ergebnis bei paritätischer Gesamtumfang

$E = \frac{A_{v. E}}{n-1} \left[1 - \left(\frac{A_H}{A_L} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$ (KTI Math 25. Au. 1937)

$A_{S \text{ gemessen}} = g^2 \cdot A \left[\frac{k}{k-1} A_H T_{45} \left[1 - \left(\frac{A_H}{A_L} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] + \frac{A_{v. E}^2}{2g} \right]$

Frage: warum g^2 , warum $\frac{k}{k-1}$, warum $A_H T_{45}$?
 (fr = 01.10.1937)

$T_{45} = T_{v. E} \quad g^2 = \frac{A_{S \text{ gemessen}}}{g^2 \cdot A} - \frac{A_{v. E}^2}{2g}$

Ergebnis je Taktverhältnis = $\frac{k}{k-1} A \left[1 - \left(\frac{A_H}{A_L} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$

Ergebnis je Gesamtumfang $\frac{1}{k-1}$

$$R_{S \text{ Gruppen}} = \frac{4 \cdot W_2^2}{24}$$

$$W_2 = \frac{3}{m} = \frac{5 \cdot 9}{42 + 42}$$

$$R_{S \text{ Gruppen}} = \frac{4 \cdot 9}{2} \left(\frac{5 \cdot 9}{42 + 42} \right)^2$$

unabhängig Gruppen

S Doppelte pro 100 prozentig mit 5,6%

G₂ 3,2%

G₄

T₂

P₄ 1,5%

P₅

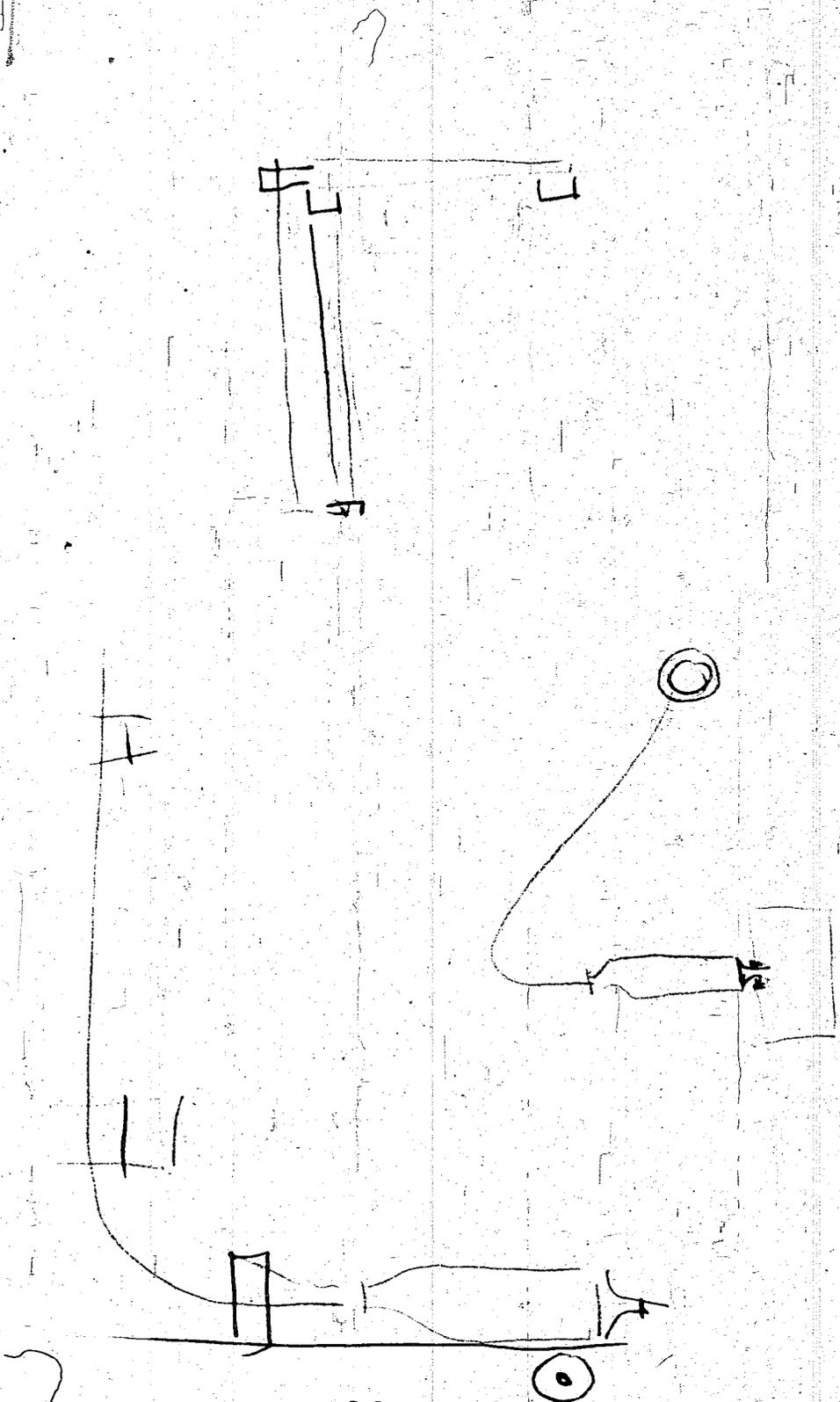
Größenverteilung

$$f_{gr} = f(T, N)$$

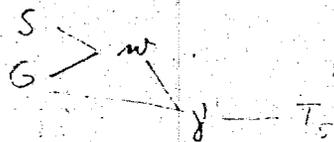
$$n = \sum (T, N) \text{ unterschied}$$

$$1 - \left(\frac{5}{84} \right)^{\frac{n-1}{4}} \text{ prozentig}$$

$$\frac{100}{24}$$



29440



RT

R > 1.15

29441

T. Temperatur

$$S = \frac{q_L + q_H}{T}$$

$$m = \frac{S \cdot g \cdot y}{q_L + q_H}$$

$$q_L + q_H = F \cdot W \cdot T$$

$$\left(\frac{m \cdot y}{x} \cdot \frac{y}{x} \right) = \frac{W}{m}$$

per unit $T = \frac{q_L + q_H}{F \cdot W}$

per unit $W = \frac{S \cdot g \cdot y}{q_L + q_H}$

per unit $T = \frac{(q_L + q_H)^2}{F \cdot S \cdot g \cdot y} = \frac{P}{R \cdot T}$

$$T = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{P}{R} \cdot \frac{F \cdot S \cdot g \cdot y}{(q_L + q_H)^2} = \frac{P \cdot S}{(q_L + q_H)^2} \cdot k$$

by $W = \frac{F \cdot g \cdot y}{R}$

Freq: 2 pump only partially unit of unit q_H ?
(unit pump)

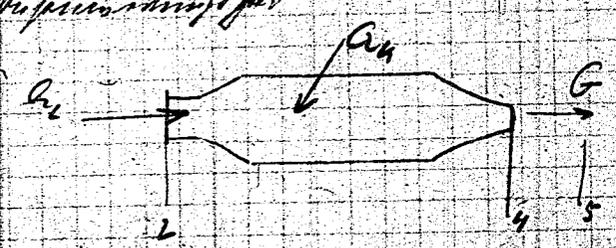
Handoff side:
Spannung abgebaut
per unit
beibehalten
erhalten

$$q_{eff} = \frac{T \cdot (q_{m1} - T_{ref})}{q_H \cdot H_{eff}}$$

$$q_{m1} \text{ per unit } q_{m2}$$

1. floor
Grundbau
Hörsaal per unit
Aufbau d. d. d. d.

per unit q_L, q_H, S per unit P
 $T = 1/2, T_1$



T. Temperatur
$$q_H = \frac{T_1 - T_2}{S \cdot T_1}$$

$$S \cdot T_1 = R \cdot T + q_H = T_2$$

Handoff side - R. d. d. d. d.

Y-messung von T_4

(2)

allgemein $q = q_w \cdot F = q_w \cdot F_2$ (aus $\frac{h \cdot \Delta T}{r}$)

$q = q_w \cdot F_2$ programmiert!
 $q = q \cdot F \cdot \sqrt{2g \frac{h}{k-1}} \cdot \left[\left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]$
 (per ΔT)

mit $H = 75.13$ 25. Luft

$q = F_0 \cdot \sqrt{2g \frac{h}{k-1}} \cdot \left[\left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]$ allgemein ΔT $\frac{h_2}{h_1}$ $\frac{P_2}{P_1}$ $\frac{v_2}{v_1}$ $\frac{c_2}{c_1}$

$q = q \cdot F \cdot \frac{P_2 \cdot F}{\sqrt{RT_2}} = q \cdot F \cdot F \cdot \frac{P_2}{\sqrt{RT_2}}$ ($P_2 = \frac{RT_2}{v_2}$)

Wenn $q = \sqrt{2g \frac{h}{k-1}} \cdot \left[\left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]$

damit $T_4 = \left(\frac{q \cdot F \cdot F \cdot P_2}{q} \right)^2 \cdot \frac{1}{R}$

notwendige Höhen

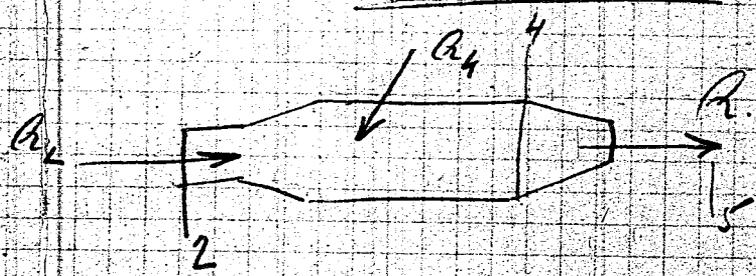
q_2, q_4, T_2, P_2, P_4

Abstrahlwinkel 10° bei q_2 nicht gegen auf 20° und 40°

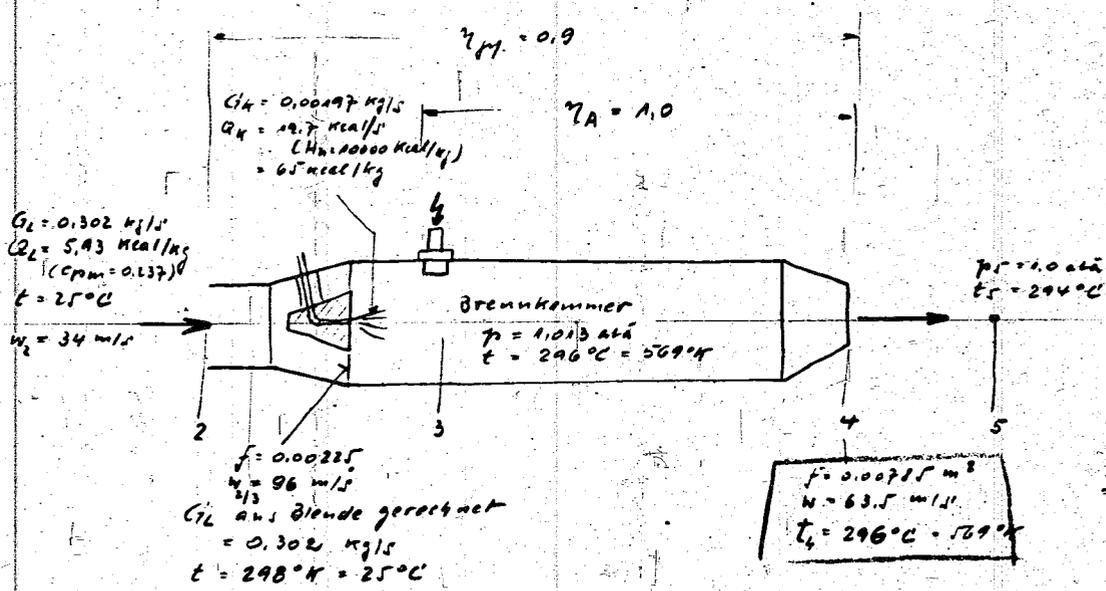
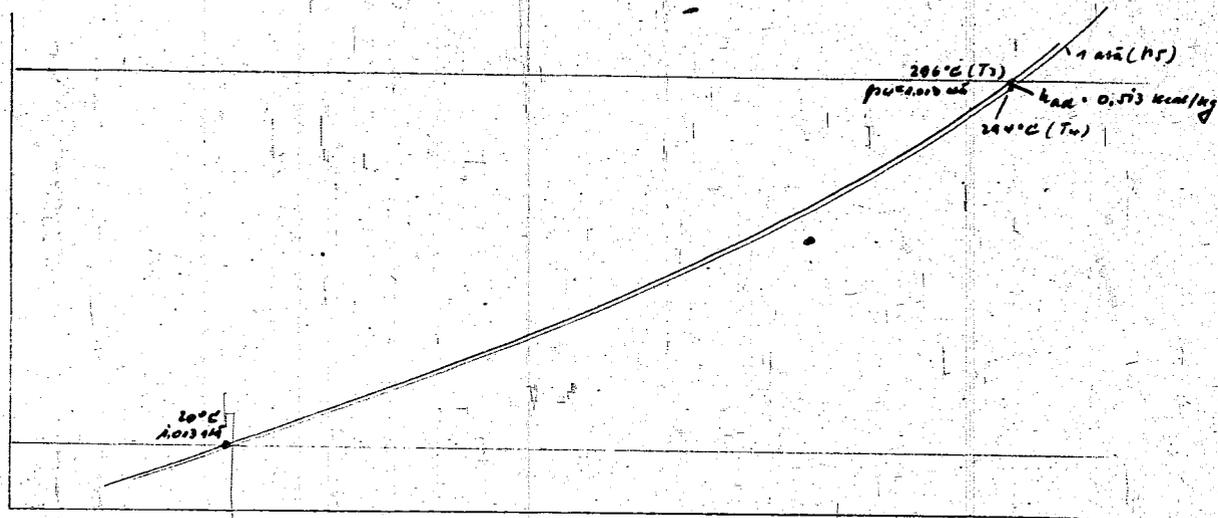
Gültigkeit

- $k = 1.4$ Luft notwendig
- $\gamma = 1.4$ Gas notwendig

III. Messung



$f = 0,1475 \frac{m^3}{s}$ ergibt die mit je mischung komprimiert
 T_{02} von $25^\circ C$. für $\gamma_A = 1,0$ mit Hilfe, was zeigt auf den fiktiv-
 bild je fiktiv, etwa $290^\circ C$ betragen. Überprüfung der die fiktiv fiktiv
 derart für die fiktiv, das ist mit je mischung der, die die fiktiv
 fiktiv. die die die - die fiktiv fiktiv die komprimiert fiktiv fiktiv
 was fiktiv auf:

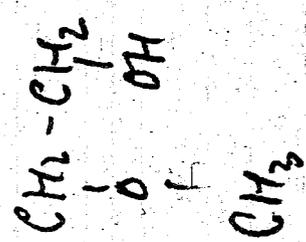
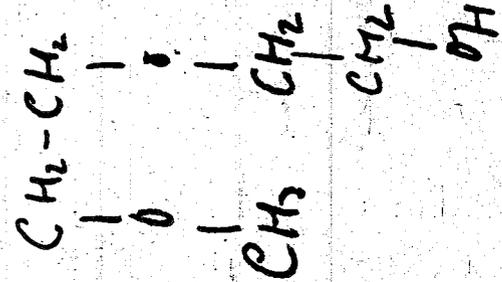


475
 5
 INSTITUT

Kuhn Weinstadtstrasse 4264
 4873

1145 ab Ma
 1320 an Fr
 1355 ab Fr
 1873 Eichberg
 1854 Gölgen

745 ab Eichberg
 803 in Gölgen



29445

2. Wärmeübergangskoeff. γ_A

I) St. Konvektion (gering)

$$\gamma_A = \frac{G_s \cdot c_p \cdot \Delta T}{G_H \cdot H_H} = \frac{0,304 \cdot 0,244 \cdot 267}{0,00197 \cdot 10000}$$

$\gamma_A \approx 1,0$

1,1
257
267

II) $\gamma_A = \frac{T_4 - T_2}{\Delta T_{12}}$

$T_2 = \text{gemittelt} = 298 \cdot K$

$$\Delta T_{12} = \frac{Q_L + Q_H}{c_{pm}} - T_2$$

$$= \frac{c_{pm} \cdot T_2 + G_H \cdot H_H}{c_{pm}} - T_2$$

$$= \frac{0,237 \cdot 25,1 + 0,0065 \cdot 10000}{0,244} - 25$$

$$= \frac{5,93 + 65,0}{0,244} - 25 = \frac{70,93}{0,244} - 25 = 292 - 25 = 267^\circ C$$

1 kg Luft = 1 m³ Luft
 $\frac{1}{20,3} = \frac{1}{11,1 \cdot 10,2} = 0,0065 \text{ kg/m}^3$

$\Delta T_{12} = 267^\circ C$

T_4 (in Formel)

$$T_4 = \left(\frac{f \cdot \bar{v} \cdot \psi \cdot P_c}{G_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{R}$$

$$\psi = 7,29 \frac{v}{k-i} \left[\left(\frac{P_c}{P_{at}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_c}{P_{at}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]$$

$$= 19,62 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 0,00376 = 1,018$$

$P_c = 1,013 \text{ atm}$
 $P_{at} = 1,0 \text{ atm}$

$\psi = 0,508$

$$T_4 = \left(\frac{0,967 \cdot 0,00785 \cdot 0,508 \cdot 1,013}{0,304} \right)^2 \cdot \frac{1}{29,2} = \frac{165,07}{29,2}$$

$T_0 = 165 \cdot K$
 $t_4 = 292^\circ C$

$\gamma_A = \frac{292 - 25}{267} = \frac{267}{267} = 1,0$

III) $\gamma_A = \frac{Q_{\text{Verfrachtung}} - Q_{22}}{Q_H}$

$Q_{1E} = c_{pm} \cdot T_{1E}$; $Q = c_{pm} \cdot T_2$; $Q_H = \frac{G_H \cdot H_H}{G_s}$

$$T_{1E} = \frac{A \cdot \bar{v} \cdot G_s}{k-i \cdot R \left[1 - \left(\frac{P_c}{P_{at}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

$$Q_{1E} = \frac{A \cdot \bar{v}^2}{2g} = \frac{A \cdot g}{26,5} \cdot s^2 \left[\frac{\text{mks} \cdot A}{s^2} \right]$$

$$= \frac{9,81 \cdot 2,04^2}{427 \cdot 2 \cdot 0,304} = 0,575 \frac{\text{mks}}{s^2}$$

Q_{1E} mit w_H korrigiert, da w_H nicht vernachlässigt werden kann
 $T_{1E} = T_4$ da keine diese angibt

11.7.71: - Kugelmännchen ergibt für einen Antriebspunkt am 1.00 atm und 25°C, 1 mm bei Kugelmännchen um 0.00197 kg/15 kg Luft bei der Kompression bei konstanter Temperatur um 296°C für verdichtungsoperation auf 10 atm sind

$w_{ad} = 14,57 \text{ kcal/grad}$ $M = 28,25$ (Molgewicht Kugelmännchen)
 $w_{ad} = \frac{14,57}{28,25} = 0,517 \text{ kcal/kg}$ $p_4 = 1,013 \text{ atm}$

$w = f \cdot q_{11} \cdot \sqrt{w_{ad}} = 0,967 \cdot 91,5 \cdot \sqrt{0,517} = 0,77$

$w = 63,5$ m/s in Antriebspunkt

Bestimmte aus w und T wie folgt 0.511 auf 25:

$w_4 = \sqrt{729 \cdot \frac{12}{1000} \cdot p_4 \cdot v_4 \left[1 - \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$

$w_4 = 0,967 \cdot \sqrt{19,62 \cdot \frac{12}{0,5} \cdot 1,013 \cdot 1,645 \left[1 - \left(\frac{1}{1,013} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]}$

$w_4 = 63,5 \text{ m/s}$

$T_4 = T_3 - \frac{A}{c_p} \cdot \frac{w_0^2}{2g}$
 $= 569 - \frac{1}{427 \cdot 0,244} \cdot \frac{63,5^2}{19,62} = 569 - 119,5$

$T_4 = 567 \text{ K}$
 $t_4 = 294 \text{ °C}$

η_{fl}:

$\eta_{fl} = \frac{G_{fl}}{g \cdot f} \cdot w = \frac{0,304}{0,967 \cdot 91,5} \cdot 63,5 = 2,044 \text{ kg}$ bei Punkt 4, bei Punkt 1 $1,88 \text{ kg}$

$T_4 = \frac{p_4 \cdot F \cdot \eta_{fl} \cdot g \cdot f}{R \cdot G_{fl}^2}$
 $10130 \cdot 0,00785 \cdot 2,04 \cdot 9,81 \cdot 0,967 = 29,2 \cdot 0,304^2$
T₄ kann mit Punkt 1 nicht, da keine Höhe gegeben, d.h. F und η_{fl} unbekannt sind!

$T_4 = 570 \text{ K}$
 $t_4 = 297 \text{ °C}$

spezifisch ein paar Parameter der Pumpen
 maximal verarbeitbar = 335° auf Pumpen
 am Ende 5 = 1,88 kg

η_{fl} am Punkt 2 bis Punkt 4:

$\eta_{fl} = \frac{T_4 \cdot c_{pm} \cdot G_{total} - T_2 \cdot c_{pm} \cdot G_2}{G_{fl} \cdot H_{fl}}$
 $= \frac{570 \cdot 0,244 \cdot 0,287 - 298 \cdot 0,237 \cdot 0,302}{0,00197 \cdot 10000}$
 $= \frac{39 - 21,3}{19,7} = \frac{17,7}{19,7}$

$\eta_{fl} = 0,9$

29447

frühe Formeln zum Kugelntrieb $G_4 [T_2]$

(1)



Spezialfallpunkt 2

$$f = \frac{G_2 \cdot s}{G_4 \cdot f} \cdot u, \quad u = \frac{s \cdot f \cdot f}{G_4 \cdot s} \quad G_2 = G_2 + G_4$$

$G_2 = F \cdot u \cdot f$, $f = \frac{G_2}{F \cdot u}$ in Ringgröße ergibt

$$f = \frac{G_2^2}{F \cdot s \cdot f \cdot f}, \quad \text{für } f = \frac{P}{RT} \text{ ist } T = \frac{P}{f \cdot R}, \text{ dann ist}$$

$$T_2 = \frac{P_2}{R} \cdot \frac{F \cdot s \cdot f \cdot f}{G_2^2}$$

f. tippenrichtungsgrad = 0.967 // *aus Formeln*
die keine Zeit

$$\eta_H = \frac{T_4 \cdot c_{pm} \cdot G_2 \cdot G_4 - T_2 \cdot c_{pm} \cdot G_2}{G_4 \cdot H_2}$$

c_{pm} für 20000 c_{pm} für 10000 $c_{pm} = f(T, T)$ *Proble Vgl.*

Wichtigste Parameter für die

bedeutende Parameter: G_2, G_4, f und P

Antwortrichtungsgrad η_A

$$\eta_A = \frac{T_4 - T_2}{\Delta T_2}$$

T_2 = *geringer*
 $\Delta T_2 = \frac{G_2 + G_4}{c_{pm}} - T_2$
kleinere Kugeln

ausgleich $\eta_A = \frac{(G_2 + G_4) / c_{pm} - T_2}{T_4 - T_2}$

$T_4 = ?$ $G = \frac{f \cdot u \cdot F \cdot f \cdot u \cdot F \cdot f}{v}$

$$v = f \cdot F \cdot \sqrt[2]{\frac{K}{K_i} \cdot R \cdot T_4 \left[\left(\frac{P_2}{P_4} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_4} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \right]} \quad (\text{für})$$

$$\psi = \sqrt[2]{\frac{K}{K_i} \cdot R \cdot T_4 \left[\left(\frac{P_2}{P_4} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_4} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \right]}$$

$$v = f \cdot F \cdot \psi \cdot \sqrt{R \cdot T_4}$$

$$v^2 = f^2 \cdot F^2 \cdot \psi^2 \cdot R \cdot T_4$$

$$G^2 = f^2 \cdot F^2 \cdot \psi^2 \cdot R \cdot T_4 \cdot \frac{P_4^2}{R^2 \cdot T_4^2}$$

$$G^2 \cdot R \cdot T_4 = f^2 \cdot F^2 \cdot \psi^2 \cdot P_4^2$$

$$T_4 = \frac{f^2 \cdot F^2 \cdot \psi^2 \cdot P_4^2}{G^2 \cdot R}$$

$$T_4 = \left(\frac{f \cdot F \cdot \psi \cdot P_4}{G} \right)^2 \cdot \frac{1}{R}$$

bedeutende Parameter: G_2, G_4, T_2, P_2, P_4

Rechnung an 170. bei G_2 nach f auf η_A mit 400. aus!

Rechnung: $u = f(T, R)$ *unabhängig!*

$$\psi = f\left(\frac{P_2}{P_4}, K\right) \text{ *unabhängig*}$$

29448

Orte:

$$\frac{3}{A} = \frac{Q_{\text{Kompression}} - Q_L}{Q_H}$$

$Q_{VE} = c_{pm} \cdot T_{VE} =$ Wärmefluss in Höhe, da Kompressionsleistung

$Q_L = c_{pm} \cdot T_L =$ Wärmefluss (Abfuhrleistung) $T_L = T_2$

$Q_H = \frac{G_H \cdot H_{WV}}{G_H} =$ gewinnig

$T_{VE} = ?$

$Q_S =$ Mägen aus Zylinder
 - Leistung bei etatspezifischer Verdichtung + kinetische Energie ($\frac{w_H^2}{2g}$)

$$\text{Lagerleistung} = \frac{P_1 \cdot V_1^{\frac{1}{n}}}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$Q_S \text{ für } 1kg = f \cdot A \cdot \left\{ \frac{1}{n-1} \cdot R \cdot T_{VE} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] + \frac{w_H^2}{2g} \right\}$ P.V. hier R.T. anpaßt

$Q_S \text{ st.} = f \cdot A \cdot G_H \cdot \left\{ \frac{1}{n-1} \cdot R \cdot T_{VE} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] + \frac{w_H^2}{2g} \right\}$

Wenn so:

$$T_{VE} = \frac{\frac{Q_S}{f \cdot A \cdot G_H} - \frac{w_H^2}{2g}}{\frac{1}{n-1} \cdot R \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} = T_{4,2}$$

kompression aus Zylinder
 = kompression mit Expansion in Höhe

$$Q_S = \frac{A \cdot w_H^2}{2g} = \frac{A \cdot g}{2 G_H} \cdot s^2$$

$$w_H = \frac{s}{m} = \frac{s \cdot g}{G_H}$$

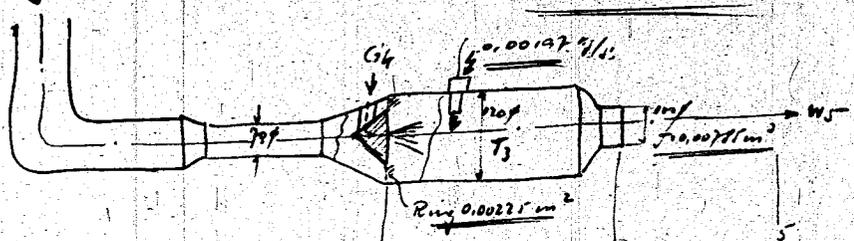
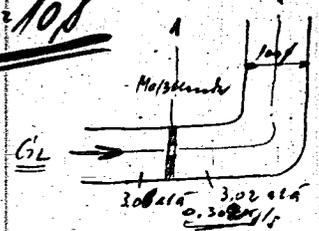
Wahrscheinlich: Zylinder s, G_L, G_H, T_L, P_1 und P_2
 Anschlagpunkte 140 101/101 um 56% 3.1% 1.5% für Frigo

jeft. mittel: $c_{pm} \cdot f(T, \rho)$ } ungenau
 $\rho \cdot f(T, \rho)$ }

$1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$ } genau
 $\frac{w_H^2}{2g}$ }

gesamtes Gasgemisch:
 $t_2 = 25^\circ\text{C} + 298\text{K}$, $G_1 = 0,302$, $G_{H_2O} = 0,00197$, $\lambda = 10,8$, $\delta = 1,884$

$R = 108$



für $\lambda = 10,8$ $\gamma = 1,4$
 Kräfteff. $\gamma = 1,4$, C_p H_2O , $M = 18$, $C_2 = 0,88$, $H_2 = 0,12$ $L_0 = 14,2$ kg/m^3
 auch H_2 -Reagenzien, Antriebsleistungen

Masse	Anteil	Gas	Anteil
4	0,19	$CO_2 = \frac{0,21 \cdot C}{(0,1 \cdot (1-0,21) + 0,21) + 1,26 \cdot H} = \frac{0,21 \cdot 0,11}{0,88[0,1 \cdot (1-0,21) + 0,21] + 1,26 \cdot 0,12} = \frac{0,15}{13,45} = 0,013$	$CO_2 = 0,00296$
28	0,22	$N_2 = CO_2 \cdot \frac{0,19}{0,21} \cdot \lambda \cdot \sigma = 0,013 \cdot \frac{0,19}{0,21} \cdot 10,8 \cdot 1,41 = 0,795$	$N_2 = 0,198$
32	0,2	$O_2 = CO_2 \cdot (1-1) \cdot \sigma = 0,013 \cdot 9,8 \cdot 1,41 = 0,119$	$O_2 = 0,0372$
18	0,2	$H_2O = \frac{CO_2 \cdot 6 \cdot h}{c} = \frac{0,013 \cdot 6 \cdot 0,12}{0,88} = 0,011$	$H_2O = 0,0077$
28,97			$H_2O = 0,0077$

Bestimmungstemp. mit jetz. Anfg. 25 $^\circ\text{C}$ H_2O

$$t_3 = \frac{\frac{c}{12} \cdot M_{cp,CO_2} + \frac{h}{2} \cdot M_{cp,H_2O} + (\lambda - 0,21) \cdot L_{min} \cdot M_{cp,H_2O}}{10000 \cdot 150} + 25$$

$$= \frac{\frac{11}{12} \cdot 10,01 + \frac{18}{2} \cdot 8,46 + (10,8 - 0,21) \cdot \frac{14,2 \cdot 150}{29,2} \cdot 7,06}{9,22} + 25$$

$$t_3 = \frac{150000}{5535,3} + 25 = 27^\circ\text{C} = \underline{\underline{296^\circ\text{C}}} = \underline{\underline{569^\circ\text{F}}}$$

$G = \frac{F \cdot W \cdot \gamma}{G}$
 $W_1 = \frac{F \cdot \gamma}{0,00785 \cdot 25} = \frac{11,2 \cdot 116}{0,00785 \cdot 25} = 11,2 \text{ m/s}$
 $W_2 = \frac{W_1 \cdot F_1 \cdot \gamma_1}{F_2 \cdot \gamma_2} = \frac{11,2 \cdot 0,00785 \cdot 25}{0,00225 \cdot 1,165} = 960 \text{ m/s}$

$G_1 = 0,302 \text{ g/s}$
 $F_1 = 0,00785 \text{ m}^2$
 $\gamma_1 = \frac{306 \cdot 1000}{298 \cdot 29,3} = 3,5$
 $W_1 \cdot F_1 \cdot \gamma_1 = W_2 \cdot F_2 \cdot \gamma_2 = G$

$G_2 = G_1$
 $F_2 = 0,00225 \text{ m}^2$
 $\gamma_2 = 1,165 \text{ kg/m}^3$ für 296°C

29450

R-

$$w_1 w_2 = \frac{1}{2} (w_1 - w_2)^2 + \dots$$

$$w_1 w_2 = \frac{1}{2} (w_1^2 - 2w_1 w_2 + w_2^2)$$

$$w_1 w_2 = \frac{w_1^2}{2} + w_2 w_2 - \frac{w_2^2}{2}$$

$$2w_1 w_2 = \frac{1}{2} (w_1^2 + w_2^2)$$

29452

$$w_a w_0 - w_0^2 = \frac{1}{2} (w_a - w_0)^2$$

$$w_a w_0 - w_0^2 = \frac{w_a^2}{2} + w_0 w_0 - \frac{w_0^2}{2}$$

$$2w_a w_0 - \frac{w_a^2}{2} - 3 \frac{w_0^2}{2}$$

29453

R+

$$\omega_a \cdot \omega_o + \frac{1}{2} (\omega_a - \omega_o)^2$$

$$\cancel{\omega_a \cdot \omega_o} + \frac{\omega_a^2}{2} \cancel{\omega_o \cdot \omega_o} + \frac{\omega_o^2}{2} \quad ?$$

29454

c) Überprüfung der Versuchsbedingungen.

Die Versuchsbedingungen sollen nicht als einwandfrei erachtet werden, solange nicht ein Gemisch von 65 Teilen Oktan und 35 Teilen Heptan nach dem angegebenen Verfahren mit einer Mischung aus 68⁺1% DAB 6 Reinbenzol (80 bis 82°C) und 32⁺1% n-Heptan gleich befunden wird. Bei einem Luftdruck von 760 mm ist für diese Bestimmung eine Verdichtung von etwa 5,3:1 notwendig. Stärkere Änderungen im Luftdruck werden das benötigte Verdichtungsverhältnis ändern.

Für laufende Untersuchungen können das erwähnte Reinbenzol und sekundäre Bezugskraftstoffe verwendet werden.

d) Genauigkeit.

Die in verschiedenen CFR-Motoren und an verschiedenen Stellen erzielten Ergebnisse sollen um höchstens zwei Oktanzahlen schwanken.

A n h a n g .

Anweisungen für die Instandhaltung des Prüfmotors.

Es wird empfohlen, eine systematische Nachprüfung der Versuchseinrichtung mit äußerster Sorgfalt nach je 50 Betriebsstunden vorzunehmen. Nachstehende Punkte sind besonders zu beachten:

a) Klopfstift.

Bei der täglichen Besichtigung sollen die Kontakte auf Sauberkeit und die Verbindungen auf ihre Güte geprüft werden. Mangelnde Empfindlichkeit, schwankende Klopfmesserablesungen oder unregelmässige Gasentwicklung können Membranstörungen anzeigen. Die Mutter zum Festhalten der Membrane soll angezogen und jede Ansammlung von Kohle beseitigt werden. Nutzt dieses nicht, so kann die Membrane beschädigt sein und Erneuerung erfordern.

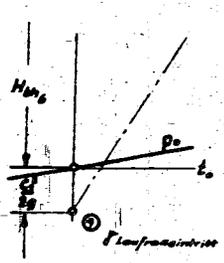
b) Unterbrecherspitzen.

Falls erforderlich, sollen Grübchen entfernt und der Spitzenabstand nachgestellt werden.

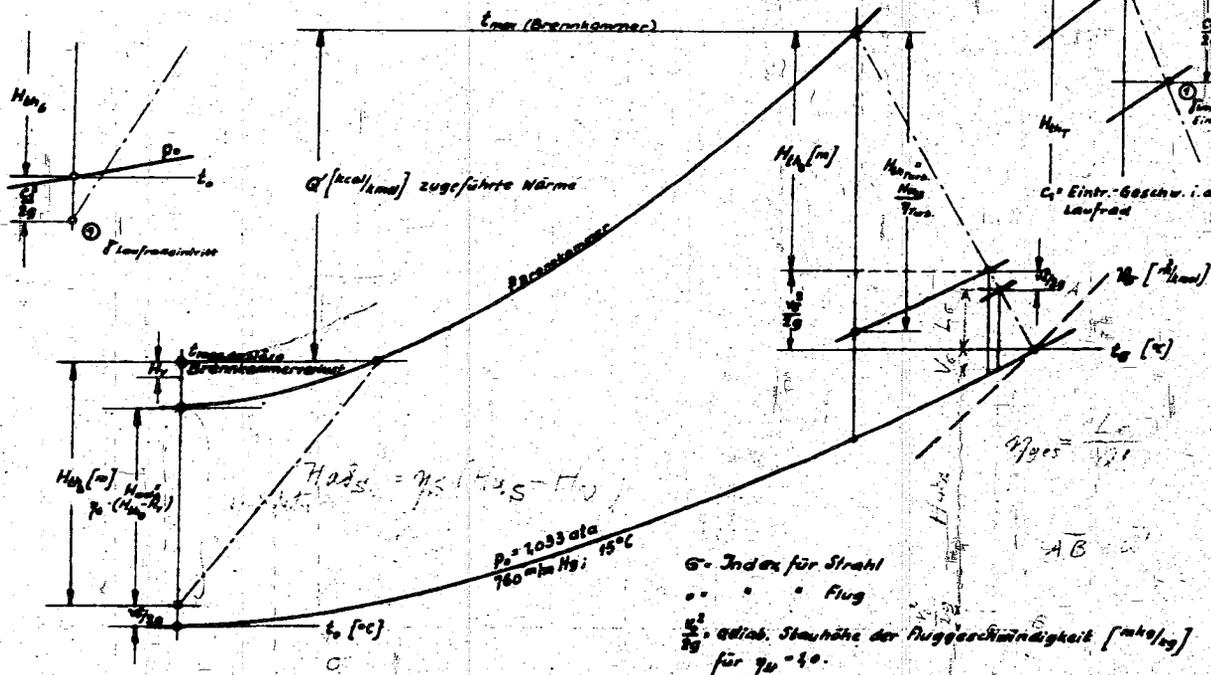
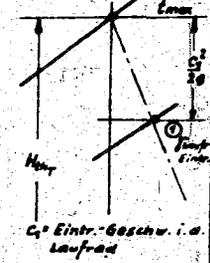
Kreisprozess

im *J-S*-Diagramm für Luft u. Verbrennungsgase.

Gebläse-Eintritt:



Turbine-Eintritt:



Luftdurchsatz:

$$G = G_0 \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot F_0 \quad [kg/sec]; \quad F_0 [m^2] \text{ Strahlfläche}; \quad \rho_0 = \frac{20,96}{R_0 \cdot T_0} \cdot \frac{p_0}{R_0 \cdot T_0} \quad [kg/m^3]$$

Schub:

$$S = \frac{G}{g} \cdot (v_4 - v_0) \quad [kg]$$

Strahlleistung:

$$L_0 = \frac{G}{g} \cdot \left(\frac{v_4^2 - v_0^2}{2} \right) \quad [mkg/sec] \quad \text{Vortriebsleistung: } L_v = S \cdot v_0 \quad [mkg/sec]$$

Brennstoffverbrauch:

$$b = \frac{a \cdot G \cdot 10^3}{S \cdot H_u} \quad [g/kg_{Luft} \cdot sec]; \quad B = b \cdot 3,6 \cdot S \quad [kg/h]$$

$$b' = \frac{a \cdot G \cdot 3,6 \cdot 10^3}{L_0 \cdot 10^3} \quad [g_{Brennstoff} / PS \cdot h]$$

Strahlwirkungsgrad:

$$\eta_r = \frac{2 \cdot v_0}{v_0 + v_4}$$

Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{therm} = \frac{\text{kin. Strahlenergie}}{\text{zugef. Wärme}} = \frac{v_4^2 - v_0^2}{8366 \cdot a} \quad 2 \cdot g \cdot 427 = 8365$$

Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta_{ges} = \eta_{th} \cdot \eta_r$$

29457

$$a = \frac{Q'}{M} = \frac{Q'}{28,96} \quad [kcal/kg]$$

$$b_0 = b_1 \cdot \frac{t_0}{g} \quad [m^3 Hg]$$

$$v = \frac{W}{M} = \frac{20}{28,96} \quad [m^3/kg]$$

735,5 m³/m³ Hg; 0°C = 1ata

$$g = \frac{M}{V} = \frac{28,96}{10} \quad [kg/m^3]$$

M = 1 mol = μkg = 28,96 kg Luft

Für $p_0 = 1,033 \text{ ata}$, $t_0 = 15^\circ C$ ist $\rho_0 = 1,226 \text{ kg/m}^3$
 Wird für den Zustand $v_0 = 0$, p_0 u. t_0 ein Gewicht G_0 [kg/sec] zu Grunde gelegt, so muß bei $v_4 > 0$ das G im Verhältnis der spez. Gewichte verändert werden, um den Volumendurchfluß (Geschw.-Dreiecke) konstant zu halten. Dadurch auch F_0 ändern (regain!).

$$G_1 = G_0 \cdot \frac{p_0}{p_1} \quad [kg/sec] \quad (\text{u. u. p. für } \eta_r = 1,0)$$

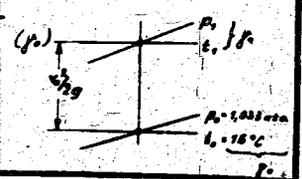
Spezifisches Gewicht im Strahl für $p_0 = p_1 = 1,033 \text{ ata}$.

t_0	ρ_0 kg/m ³
400	0,524
450	0,467
500	0,458
550	0,428
600	0,409
650	0,382

427 mkg = 1kcal; A = 1/227

$H_u = 10^8 \text{ kcal/kg}$ für Benzin

v_0 m/sec	t_0 °C	p_0 ata	a kcal/kg
0	15	1,033	1,226
100	19	1,100	1,28
200	34	1,320	1,46
250	45	1,480	1,59
300	59	1,730	1,73



1.) Rocket

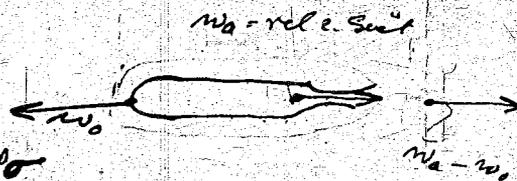
$$\text{Schub } S = m^* w_a$$

$$\text{Verlust } S \cdot w_0 = m^* w_a w_0$$

$$\text{Verlust } m^* \frac{(w_a - w_0)^2}{2}$$

$$\text{Gesamt} = m^* \left(\frac{w_a^2}{2} + \frac{w_0^2}{2} \right)$$

$$\eta_{\text{Winkel}} = 2 \cdot \frac{w_a w_0}{w_a^2 + w_0^2}$$



2.) Abzweigung

$$\text{Schub } m^* (w_a - w_0)$$

$$\text{Verlust } m^* (w_a w_0 - w_0^2)$$

$$\text{Verlust } m^* \frac{(w_a - w_0)^2}{2}$$

$$\text{Gesamt } m^* \left(\frac{w_a^2}{2} - \frac{w_0^2}{2} \right)$$

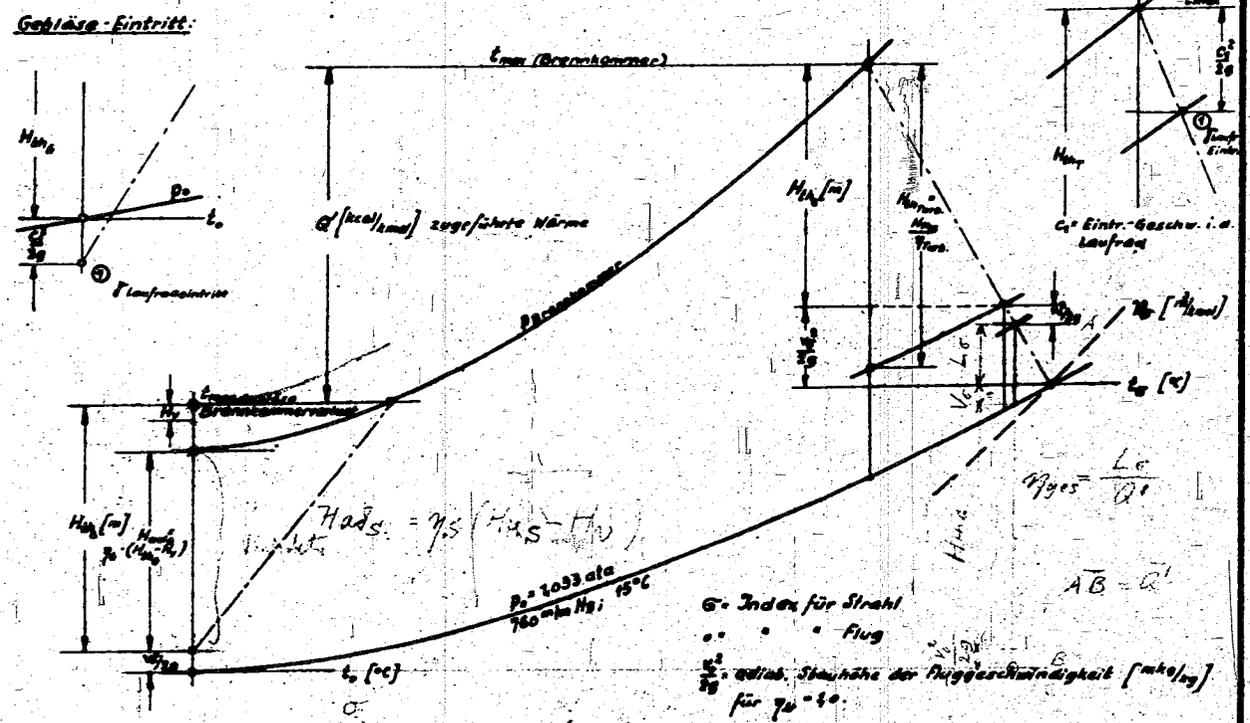
$$\eta_{\text{Winkel}} = 2 \left[\frac{w_a w_0}{w_a^2 - w_0^2} - \frac{w_0^2}{w_a^2 - w_0^2} \right]$$

$$= 2 w_0 \frac{(w_a - w_0)}{w_a^2 - w_0^2} = \frac{2 w_0}{w_a + w_0}$$



Kreisprozess

im J-S-Diagramm für Luft u. Verbrennungsgase.



Luftdurchsatz:

$$G = F_0 \cdot \rho_0 \cdot v_0 \quad [kg/sec], \quad F_0 [m^2] \text{ Strahlfläche; } \rho_0 = \frac{28,96}{R_0 \cdot T_0} \cdot p_0 \quad [kg/m^3]$$

Luftstoffvermahlung?

Schub:

$$S = \dot{G} \cdot (v_4 - v_0) \quad [kg]$$

Strahlleistung:

$$L_0 = \frac{\dot{G}}{g} \left(\frac{v_4^2 - v_0^2}{2} \right) \quad [mkg/sec] \quad \text{Vortriebsleistung: } L_v = S \cdot v_0 \quad [mkg/sec]$$

Brennstoffverbrauch:

$$b = \frac{a \cdot G \cdot 10^3}{S \cdot H_u} \quad [g/kg_{Luft} \cdot sec]; \quad B = b \cdot 3,6 \cdot S \quad [kg/h]$$

$$b' = \frac{a \cdot G \cdot 3,6 \cdot 10^3}{L_0 \cdot 10^3} \quad [g/ps \cdot h]$$

Strahlwirkungsgrad:

$$\frac{L_v}{L_0} = \eta_s = \frac{2 \cdot v_0}{v_4 + v_0}$$

Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{therm.} = \frac{\text{kin. Strahlenergie}}{\text{zugef. Wärme}} = \frac{v_4^2 - v_0^2}{8366 \cdot a} \quad 2 \cdot g \cdot 427 = 8365$$

Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta_{Ges} = \eta_{th} \cdot \eta_s$$

29457

$$a = \frac{a'}{M} = \frac{a'}{28,96} \quad [kcal/kg]$$

$$b_0 = b_1 \cdot \frac{t_1}{t_0} \quad [m^3/m^3]$$

$$v = \frac{v'}{M} = \frac{v'}{28,96} \quad [m^3/kg]$$

$$735,5 \text{ m}^3/m^3; \quad 0^\circ C = 1 \text{ ata}$$

$$\rho = \frac{M}{v} = \frac{28,96}{v} \quad [kg/m^3]$$

$$M = 1 \text{ mol} \cdot \mu_{kg} = 28,96 \text{ kg Luft}$$

Für $p_0 = 1,033 \text{ ata}$, $t_0 = 15^\circ C$ ist $\rho_0 = 1,226 \text{ kg/m}^3$
 Wird für den Zustand $v_0 = 0$, p_0 u. b_0 ein Gewicht $G_0 [kg/sec]$ zu Grunde gelegt, so muß bei $v_0 > 0$ das G im Verhältnis der spez. Gewichte verändert werden, um den Volumendurchfluß (Geschw.-Drucke) konstant zu halten. Dadurch auch t_0 ändern (regeln).

$$G_0 = G_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho} \quad [kg/sec] \quad (\text{u. u. p. für } \eta_u = 1,0)$$

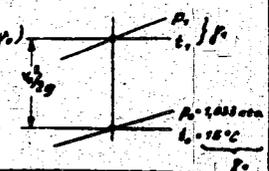
Spezifisches Gewicht im Strahl für $p_0 = p_0 = 1,033 \text{ ata}$.

t_0	ρ_0 kg/m^3
400	0,524
450	0,467
500	0,458
550	0,428
600	0,401
650	0,382

$$427 \text{ mkg} = 1 \text{ kcal}; \quad A = 1/127$$

$$H_u = 10^4 \text{ kcal/kg für Benzin}$$

v_0 m/sec	t_0 $^\circ C$	p_0 ata	ρ_0 kg/m^3
0	15	1,033	1,226 (ρ_0)
100	19	1,100	1,28
200	34	1,320	1,46
250	45	1,480	1,59
300	58	1,730	1,73



Entwurf 2φ

Im dem Arbeitsblatt „Kreisprozess von T-2-Diagramm für Luft und Verbrennungsprozess“ (Sach-Ing. R.-R. Phd. 1.5.42, Kleinor 27.7.1942) sind einige Gleichungen aufgestellt, die von Lieberkühn zur Erläuterung stellen möchten.

a) Für die Strahlleistung ist angegeben

$$L_0 = \frac{G}{f} \left(\frac{v_0^2 - v_1^2}{2} \right) \quad [\text{mkg/sec}] \quad 1)$$

Falls nicht über den Betrag der Strahlleistung ein Aufschluß zu bestehen, ist dies aus unserer Auffassung

$$L_0 = \frac{G}{f} \cdot \frac{v_0^2}{2} \quad [\text{mkg/sec}] \quad 2)$$

b) Die Arbeit ist jetzt

für den Fall $L = \frac{G}{f} (v_0 - v_1)$ [mkg/sec] 3) und

für den Fall $L_0 = \frac{G}{f} v_0$ [mkg/sec] 4) sind

$$L_0 = \frac{G}{f} (v_0 \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2}) \quad [\text{mkg/sec}]$$

In dem vorliegenden

für die Fall $L_0 = \frac{G}{f} (v_0 \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2})$ [mkg/sec] 5)

und für die Fall $L_0 = \frac{G}{f} (v_0 - \frac{v_0}{2})$ [mkg/sec] 6)

A →

Den Unterschied der beiden Ansätze erkennt man auch aus der Betrachtung der Grenzfälle. Für $v_0 = 0$ ergibt sich Übereinstimmung

$$I = \frac{G \cdot v_0}{g}$$

8) und

$$L_v = 0$$

9).

Für ~~den Grenzfalle~~ $v_0 = v_0$ hingegen liefert das Modell

$$I = 0$$

10) und

$$L_v = 0$$

11) während

aus der Formel ergibt

$$I = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_0}{2}$$

12) und

$$L_v = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_0^2}{2} = G \cdot \frac{v_0^2}{2g}$$

13).

Unter ~~der~~ ^{der} Bedingung $I = 0$ und $L_v = 0$ ~~erhalten~~

$$\text{für } v_0 = 2 v_0$$

14).

Wie sich schon aus dem obigen Wertetabelle ergibt, ist die Theorie von H. M. und G. nicht, im Hinblick auf die in der Physik (S. 441/42) und Physik (Dampf- und Gasdynamik S. 192) S. 214/15). Es darf die von den beiden Autoren behauptete

$$\vec{c}_m = M(u - u_0)$$

in Bezug auf den Luftdruck p_0 und ρ_0

$$\vec{c} = M(u_0 - \frac{u^2}{2})_0$$

29459

Es keine Änderung und nicht auf jeden Fall die mit ρ_0 ist.

Wie würde es aussehen, wenn die Luft zu einem anderen

Fugendruck p_0 überführt

Zeit t_0

$$Q = F \cdot f_0 \cdot v_0$$

$$Q = \frac{\rho \cdot g}{\gamma} \left(v_0 - \frac{v_0}{2} \right) \leftarrow L_v = \rho \cdot v_0$$

$$L_v = \frac{\rho \cdot g}{\gamma} \left(v_0 \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2} \right) \equiv$$

$$b = \frac{Q \cdot g \cdot 10^3}{\rho \cdot \gamma \cdot h_u}$$

$$b' = \frac{Q \cdot g \cdot 3,6 \cdot 10^3}{L_v \cdot 10^4 \cdot h_u}$$

$$\eta_v = \frac{L_v}{L_0} = \frac{(v_0 - \frac{v_0}{2}) \cdot v_0}{v_0 \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2}} = 1 \quad \}$$

29460

$$Q_f = F_0 \cdot f_0 \cdot v_0$$

$$P = \frac{Q_f}{g} \left(v_0 - \frac{v_0}{2} \right)$$

$$L_v = P \cdot v_0 = \frac{Q_f}{g} \left(v_0 \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2} \right)$$

$$L = \frac{Q \cdot Q \cdot 10^3}{P \cdot \eta_u}$$

$$L' = \frac{Q \cdot Q \cdot 10^3 \cdot 3600,75}{L_v \cdot 10^4 \cdot \eta_u}$$

$$L_0 = \frac{Q_f}{g} \cdot \frac{v_0^2}{2}$$

$$\eta_0 = \frac{L_v}{L_0} = \frac{v_0 \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2}}{\frac{v_0^2}{2}}$$

$$\eta_{th} = \frac{\text{kinet. Bewegungsenergie}}{\text{aufg. Wärme}} = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{1}{427} \cdot \frac{1}{g}$$

$$\eta_{ges} = \eta_{th} \cdot \eta_u$$

29461

Exp. Wert

In dem Arbeitblatt „Kreisprozess im T-S-Diagramm“
 Zeit und Verbrennungsphase (Sept.-Tag. R.-R. Blatt Nr. 1. 8. 43, Klausur
 27.7.1943) befindet sich eine Aufgabe, in deren Lösung ich
 vor vers. anfragen. Wie schreiben die folgenden Formeln ab?
 Im Formelbuch sind nur wenige abgefragt. Ich möchte

die Formeln
 & auch die
 Erweit. für den
 Arbeit. gegeben

$$d = \frac{p}{\rho} (v_2 - v_1)$$

Arbeit ist in der gleichen
 wie das Volumen
 zu sehen ist:

$$d = \frac{p}{\rho} (v_2 - v_1)$$

Gegeben:

Luftdruck:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Reibk

Arbeit:

$$d = \frac{p}{\rho} (v_2 - v_1)$$

h

Verdrängung:

$$L_v = p \cdot v_0 = \frac{p}{\rho} (v_2 - v_1)$$

h

Leistung:

$$L = \frac{p}{\rho} \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

h

Druckverlust:

$$L = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\rho \cdot v_0}$$

g/Reibk. etc

Stromleistung:

$$L = \frac{2 \cdot g \cdot 10^3 \cdot 3600 \cdot 25}{L_v \cdot 10^3 \cdot 74}$$

g/Reibk. etc

$$\eta_0 = \frac{L_v}{L_0} = \frac{v_2 \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2}}{\frac{v_2^2}{2}}$$

Thermisches Wirkungsgrad: $\eta_{th} = \frac{\text{kinet. Stromleistung}}{\text{zugeführte Wärme}} = \frac{v_2^2}{2g \cdot 427 \cdot 1}$

Gesamtwirkungsgrad: $\eta_{ges} = \eta_{th} \cdot \eta_0$

In dem Glauben an die Richtigkeit unserer Ansätze bestärkt
uns auch die Betrachtung der Grenzfälle. Wir befinden uns übrigens
in Übereinstimmung mit Schülz, z. B. Schülz, Technische Thermodynamik,
vierte, neu bearbeitete Auflage, erster Band, 1926, S. 441/42.

Wir wären Ihnen für eine Rückübernahme bzw. Klärung
sehr dankbar.

Freilich!

(c) Entwurf

$$\frac{S}{g} \cdot v = \frac{S}{g} \cdot \frac{v}{v} = v^2$$

In dem Arbeitsblatt "Kreisprozeß im I-S-Diagramm für Luft und Verbrennungsgase" (Dipl. Ing. K.K. Schade 1.8.46, Kleiner 27.7.43) sind einige Gleichungen aufgestellt, die wir hierdurch zur Erörterung stellen möchten.

a) Für die Strahlleistung ist angeschrieben

$$L = \frac{G}{g} \left(\frac{v_r^2 - v_0^2}{2} \right) \quad [\text{mkg/sec}] \quad 1)$$

Falls nicht über den Begriff der "Strahlleistung" ein Mißverständnis besteht, ist diese nach unserer Auffassung

$$L = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_r^2}{2} \quad [\text{mkg/sec}] \quad 2)$$

b) Das Arbeitsblatt gibt weiter an

$$\text{für den Schub } S = \frac{G}{g} (v_r - v_0) \quad [\text{kg}] \quad 3) \text{ und}$$

$$\text{für die Vertriebsleistung } L_V = S \cdot v_0 \quad [\text{mkg/sec}] \quad 4), \text{ also}$$

$$L_V = \frac{G}{g} (v_r \cdot v_0 - v_0^2) \quad [\text{mkg/sec}] \quad 5).$$

Demgegenüber erhalten wir

$$\text{für die Vertriebsleistung } L_V = \frac{G}{g} \left(v_r \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2} \right) \quad [\text{mkg/sec}] \quad 6)$$

und gemäß 4) für den Schub

$$S = \frac{G}{g} \left(v_r - \frac{v_0}{2} \right) \quad [\text{kg}] \quad 7).$$

Wir befinden uns u.E. in Übereinstimmung mit Schüle (z.B. Techn. Thermodyn. vierte, neue bearb. Aufl., erster Bd., 1926, S. 441/42) und Stodola (Dampf- und Gasturbinen 5. Aufl. 1922 S. 254/55). Es darf für den Fall des Strahlantriebes nicht gesetzt werden, (Stä., Gl. 40)

$$E_n = M (w - M) \omega,$$

sondern es kommt aus Gl. 35) und 36)

$$E = M \left(w \omega - \frac{M \omega^2}{2} \right),$$

da keine Drehung und somit auch keine Fliehkraftarbeit vorhanden ist.

Den Unterschied der beiden Ansätze erkennt man auch aus der Betrachtung der Grenzfälle. Für $v_0 = 0$ ergibt sich übereinstimmend:

$$S = \frac{G}{g} \cdot v_r \quad 8) \text{ und}$$

$$L_V = 0 \quad 9).$$

Für $v_0 = v_r$ hingegen liefert das Arbeitsblatt

$$S = 0 \quad 10) \text{ und}$$

$$L_V = 0 \quad 11),$$

während unser Ansatz ergibt

$$S = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_r}{2} \quad 12) \text{ und}$$

$$L_v = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{2} = G \cdot \frac{v^2}{2g}$$

13)

Wir würden $S = 0$ und $L_v = 0$ erhalten

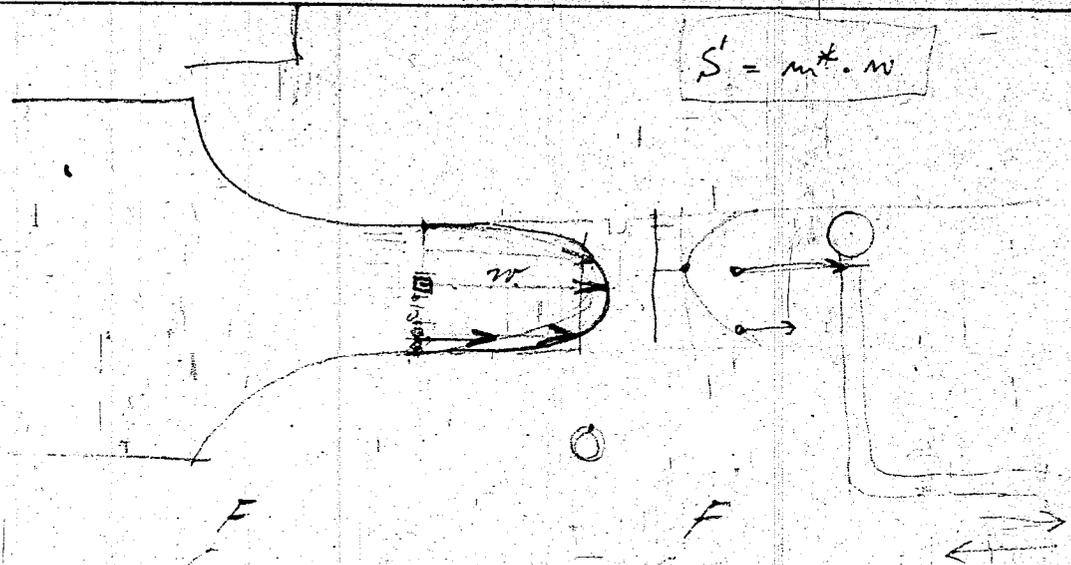
für $v_0 = 2 \sqrt{g}$

14)

Wir würden es begrüßen, wenn Sie sich zu dem angeschnittenen Fragenkomplex äußern würden.

29466

$$S' = m \cdot w$$



$$I = \int \frac{F}{g} w^2 ds = \frac{F}{g} \int w^2 ds$$

$$I = \frac{F}{g} \int w^2 ds \quad ; \quad w = \frac{dx}{dt}$$

$$I = \frac{F}{g} \int w^2 ds = \frac{F}{g} \int \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 ds$$

$$I = \frac{F}{g} \int w^2 ds$$

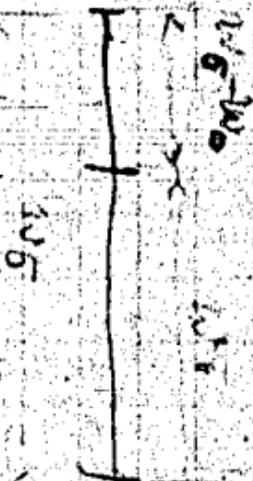
$$I = \frac{F}{g} \int w^2 ds$$

$$H = \int_0^{20} \frac{q}{g} dT$$

$$I = -i_{i_{max}} + i_{i_{med}} 203$$

$$= \int_0^{i_{max}} q dt - \int_0^{i_{max}} \frac{q}{g} dT + i_{i_{med}}$$

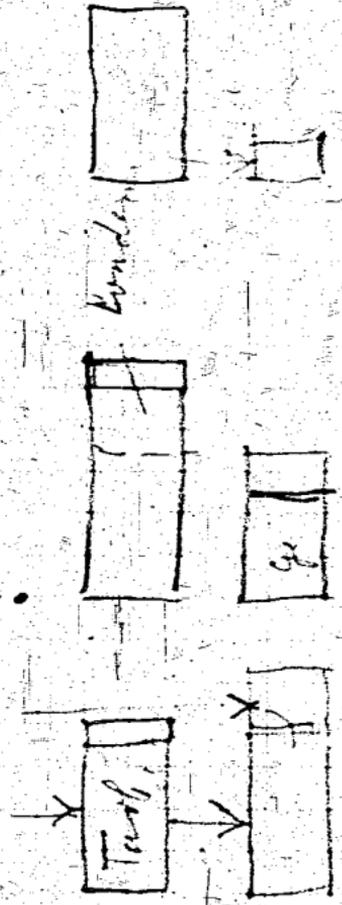
20587



29468

Handwritten notes

Handwritten notes



29469

$$S = \frac{v_0^2}{g} \ln \frac{v_0}{v_0 - v_1}$$

$$\frac{m \cdot v}{g}$$

S. v. 0 Arbeitsleistung

Arbeitsleistung

$$\frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$\frac{v_0^2}{g} \ln \frac{v_0}{v_0 - v_1}$$

$$v_1 = \frac{g \cdot S}{v_0}$$

$$v_1^2 = \frac{g \cdot S}{v_0} \cdot \frac{v_0}{g}$$

$$\frac{v_0^2}{g} \ln \frac{v_0}{v_0 - v_1}$$

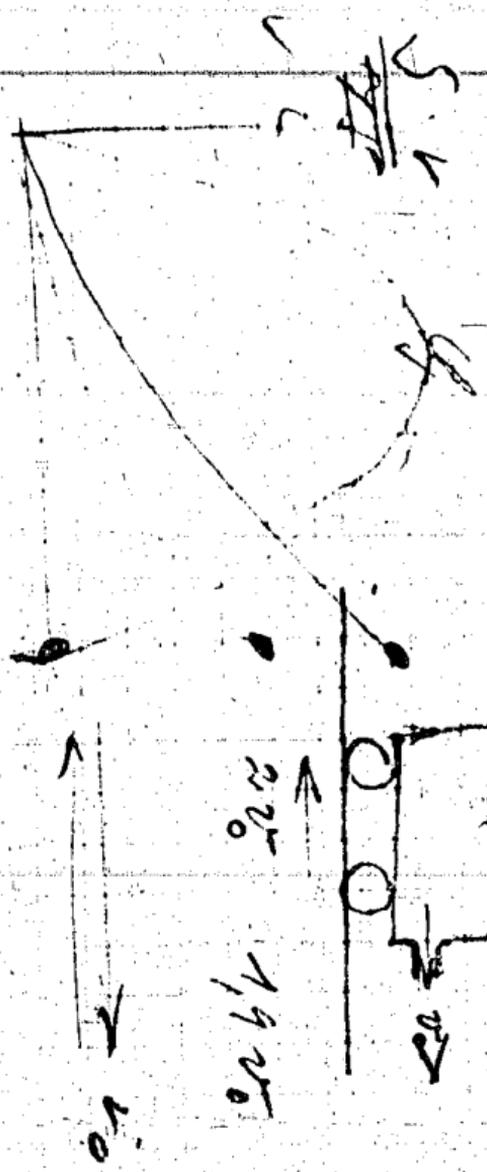
\rightarrow



29470

S₀ 25/11 - 110/1
w.v.

S₀ 25/11 - 110/1



29471

1
2

← →
15.2

2
1

29472

Entwurf

In dem Arbeitsblatt "Kreisprozess im I-S-Diagramm für Luft und Verbrennungsgase" (Dipl.-Ing. K.K. Schade 1.8.6, Kleiner 27.7.43) sind einige Gleichungen aufgestellt, die wir hierdurch zur Erörterung stellen möchten.

a) Für die Strahlleistung ist angeschrieben

$$L = \frac{G}{g} \left(\frac{v_c^2 - v_0^2}{2} \right) \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 1)$$

Falls nicht über den Begriff der "Strahlleistung" ein Mißverständnis besteht, ist diese nach unserer Auffassung

$$L = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_c^2}{2} \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 2)$$

b) Das Arbeitsblatt gibt weiter an

$$\text{für den Schub } S = \frac{G}{g} (v_c - v_0) \quad [\text{kg}] \quad 3) \text{ und}$$

$$\text{für die Vertriebsleistung } L_v = S \cdot v_0 \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 4), \text{ also}$$

$$L_v = \frac{G}{g} (v_c \cdot v_0 - v_0^2) \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 5)$$

Demgegenüber erhalten wir

$$\text{für die Vertriebsleistung } L_v = \frac{G}{g} (v_c \cdot v_0 - \frac{v_0^2}{2}) \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 6)$$

und gemäß 4) für den Schub

$$S = \frac{G}{g} (v_c - \frac{v_0}{2}) \quad [\text{kg}] \quad 7)$$

Wir befinden uns u.E. in Übereinstimmung mit Schüle (z.B. Techn. Thermodyn. vierte, neue bearb. Aufl., erster Bd., 1926, S. 441/42) und Stodola (Dampf- und Gasturbinen 5. Aufl. 1922 S. 254/55). Es darf für den Fall des Strahlantriebes nicht gesetzt werden. (Std., Gl. 40)

$$E_m = M (w - M) M,$$

sondern es kommt aus Gl. 35) und 36)

$$E = M (w u - \frac{u^2}{2}),$$

da keine Drehung und somit auch keine Fliehkraftarbeit vorhanden ist.

Den Unterschied der beiden Ansätze erkennt man auch aus der Betrachtung der Grenzfälle. Für $v_0 = 0$ ergibt sich übereinstimmend:

$$S = \frac{G}{g} \cdot v_c$$

$$L_v = 0$$

8) und

9).

Für $v_0 = v$ hingegen liefert das Arbeitsblatt

$$S = 0$$

$$L_v = 0$$

10) und

11),

während unser Ansatz ergibt

$$S = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_c}{2}$$

12) und

29474

$$L_v = \frac{g}{c} \cdot \frac{v^2}{2} = 0 \cdot \frac{v^2}{2c} \quad 13)$$

Man würde $s = 0$ und $L_v = 0$ erhalten

für $v_0 = 2v_0 \quad 14)$

Wir würden es begrüßen, wenn Sie sich zu dem angeschnittenen Fragenkomplex äußern würden.

Entwurf

In dem Arbeitsblatt "Kreisprozeß im I-S-Diagramm für Luft und Verbrennungsgase" (Dipl.-Ing. K.K. Schade 1.8.6, Kleiner 27.7.43) sind einige Gleichungen aufgestellt, die wir hierdurch zur Erörterung stellen möchten.

a) Für die Strahlleistung ist angeschrieben

$$L = \frac{G}{g} \left(\frac{v_c^2 - v_0^2}{2} \right) \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 1)$$

Falls nicht über den Begriff der "Strahlleistung" ein Mißverständnis besteht, ist diese nach unserer Auffassung

$$L = \frac{G}{g} \cdot \frac{w^2}{2} \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 2)$$

b) Das Arbeitsblatt gibt weiter an

$$\text{für den Schub } S = \frac{G}{g} (v_c - v_0) \quad \text{kg} \quad 3) \text{ und}$$

$$\text{für die Vertriebsleistung } L_v = S \cdot v_0 \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 4), \text{ also}$$

$$L_v = \frac{G}{g} (v_c - v_0) \cdot v_0 \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 5)$$

Demgegenüber erhalten wir

$$\text{für die Vertriebsleistung } L_v = \frac{G}{g} (v_c - v_0 - \frac{v_0^2}{2}) \quad [\text{mkg/sec.}] \quad 6)$$

und gemäß 4) für den Schub

$$S = \frac{G}{g} (v_c - \frac{v_0}{2}) \quad [\text{kg}] \quad 7)$$

Wir befinden uns u.E. in Übereinstimmung mit Schüle (s.B. Techn. Thermodyn. vierte, neue bearb. Aufl., erster Bd., 1926, S. 441/42) und Stodola (Dampf- und Gasturbinen 5. Aufl. 1922 S. 254/55). Es darf für den Fall des Strahlantriebes nicht gesetzt werden. (Stu., Gl. 40)

$$E_m = H (w - \frac{w^2}{2})$$

sondern es kommt aus Gl. 35) und 36)

$$E = H (w - \frac{w^2}{2})$$

da keine Drehung und somit auch keine Fliehkraftarbeit vorhanden ist.

Den Unterschied der beiden Ansätze erkennt man auch aus der Betrachtung der Grenzfälle. Für $v_0 = 0$ ergibt sich übereinstimmend:

$$S = \frac{G}{g} \cdot v_c \quad 8) \text{ und}$$

$$L_v = 0 \quad 9).$$

Für $v_0 = v_c$ hingegen liefert das Arbeitsblatt

$$S = 0$$

$$L_v = 0$$

während unser Ansatz ergibt

$$S = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_c}{2}$$

12) und

29476

10) und

11).

$$L_V = \frac{q}{g} \cdot \frac{v^2}{2} = 0 \cdot \frac{v^2}{2g} \quad 13)$$

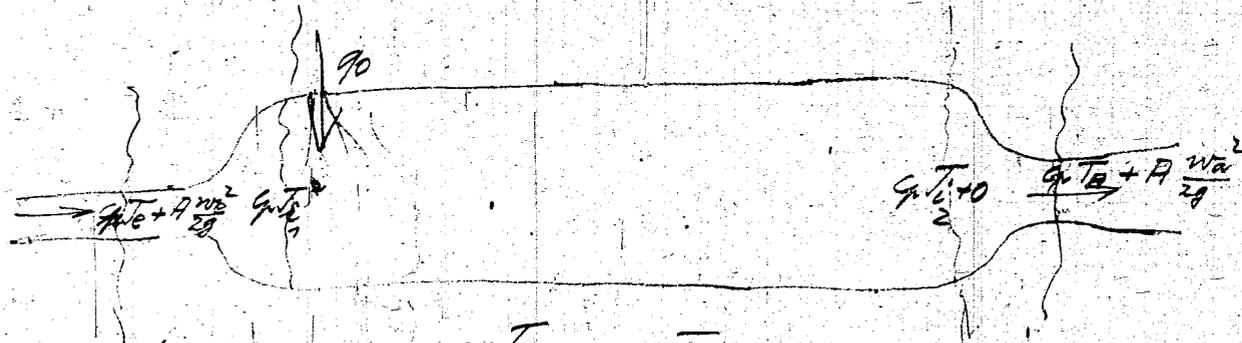
Wir würden $S = 0$ und $L_V = 0$ erhalten

für $v_0 = 2 v_0$ 14)

Wir würden es begrüßen, wenn Sie sich zu den angeschnittenen Fragenkomplex äußern würden.

29477

911 (continued) - find an extra differential in total



$$\alpha_1 = \frac{G_p T_{i_1} - G_p T_{e_1}}{90}$$

$$\alpha_2 = \frac{G_p T_{i_2} + A \frac{w_0^2}{2g} - G_p T_{e_2} - A \frac{w_0^2}{2g}}{90}$$

$$\frac{A w_0^2}{2g} = \frac{90 \text{ ft}}{8380} = 11 \frac{\text{ft}}{\text{sec}}$$

$$\Delta T = 11 \text{ sec}$$

29478