

3. Wirkungsgrad und Verbrennungsablauf im Dieselmotor

Von Prof. Dr.-Ing. L i s t

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der Technischen Hochschule Graz

Ein grundsätzlicher Überblick über die Zusammenhänge zwischen dem zeitlichen Ablauf der Verbrennung, der Leistung, und dem Wirkungsgrad kann am vollkommenen Motor mittels thermodynamischer Rechnungen gewonnen werden.

Der vollkommene Motor stellt, wie bekannt, das unerreichbare Ziel der Entwicklung im Motorenbau dar. Er verwirklicht den motorischen Arbeitsvorgang ohne Verluste, außer denen, die zwangsläufig mit dem Arbeitsverfahren verbunden sind, und gibt den Maßstab für die Güte des wirklichen Motors. Bei neuzeitlichen Motoren liegt der Gütegrad zwischen 70 und 80 %, d. h. dieser Bruchteil der im vollkommenen Motor aus der gleichen Brennstoffmenge erzielbaren Arbeit wird im wirklichen Motor geleistet. Die zusätzlichen Verluste im wirklichen Motor sind demnach nicht allzu erheblich und daher die für den vollkommenen Motor entwickelten Zusammenhänge mit recht guter Annäherung auch für den wirklichen Motor gültig.

Bei den neuzeitlichen Untersuchungen am vollkommenen Motor werden die wirklichen physikalischen Eigenschaften der Gase und die chemischen Veränderungen und chemischen Gleichgewichtsverhältnisse bei der Verbrennung berücksichtigt. Verdichtung und Ausdehnung erfolgt nach Adiabaten. Der Zustandsänderung während der Verbrennung werden einfache Gesetze zu Grunde gelegt.

Um brauchbare Schlüsse vom vollkommenen auf den wirklichen Motor ziehen zu können, ist es notwendig, die Druckverhältnisse während der Verbrennung bei beiden annähernd in Übereinstimmung zu bringen. Das ist möglich, wenn die Endpunkte der Verdichtung des wirklichen und des Diagramms der vollkommenen Maschine zur Deckung gebracht werden.

Zwischen dem Druckverlauf während der Verbrennung, wie ihn das Diagramm gibt, und dem zeitlichen Verlauf der Wärmeentwicklung besteht ein eindeutiger Zusammenhang. Die Darstellung der Wärmeentwicklung erfolgt am klarsten durch das Brenngesetz, in welchem die Brenngeschwindigkeit, ausgedrückt durch die je Zeiteinheit frei werdende Wärme, in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt wird. Als Zeitmaß gilt der Kurbelwinkel.

Die Zielsetzung bei der Gestaltung des idealen Brenngesetzes ergibt sich einerseits aus dem Streben nach gutem Wirkungsgrad, andererseits auch aus Anforderungen, die an den Druckverlauf zu stellen sind. Mit Rücksicht auf die Haltbarkeit der Bauteile, derzeit vor allem der Lager, ist eine Begrenzung des bei der Verbrennung auftretenden Höchstdruckes erforderlich. Die Grenze ist vom Stande der Entwicklung abhängig und liegt heute bei Fahrzeugmotoren im allgemeinen zwischen 50 und 80 kg/cm². Pischinger hat in rechnerischen Untersuchungen an Schubstangen nachgewiesen,

daß die Höhe der wirklich auftretenden Beanspruchung auch wesentlich von der Geschwindigkeit des Druckanstieges abhängt. Sie kann bei steilem Anstieg des Druckes ein Vielfaches der statischen Beanspruchung betragen. Von der Steilheit des Druckanstieges hängt auch das Zündgeräusch des Motors im Wesentlichen ab. Im praktischen Betrieb ergeben sich in dieser Hinsicht befriedigende Verhältnisse, wenn der Druckanstieg $2 \text{ at}/^{\circ}\text{KW}$ nicht wesentlich überschreitet.

Die Forderung nach einer Begrenzung der Höchstdruckes läßt sich bei der vollkommenen Maschine am einfachsten durch ein Diagramm mit gemischter Verbrennung erfüllen. Bei diesem schließt sich an eine Gleichraumverbrennung eine Gleichdruckverbrennung an. Die Grenzfälle sind die reine Gleichraum- und die reine Gleichdruckverbrennung.

Verändert man bei gemischter Verbrennung und gleichbleibendem Höchstdruck das Verdichtungsverhältnis, so erhält man die in Bild 1 dargestellten Wirkungsgrade. Der Luftüberschuß wurde mit $\lambda = 1,4$, demnach ungefähr Vollast entsprechend, angenommen. Die Wirkungsgrade werden am größten bei der reinen Gleichdruckverbrennung, wenn also die Drucksteigerung auf den gegebenen Höchstdruck allein durch die Verdichtung erfolgt. Ein kleiner Gleichraumteil beeinträchtigt den Wirkungsgrad nicht wesentlich. Bei gegebenem Höchstdruck ist demnach mit Rücksicht auf den Wirkungsgrad das Gleichdruckdiagramm anzustreben.

Bild 2 zeigt nun für verschiedene Verdichtungsverhältnisse und damit für verschiedene Anteile des Gleichraumteils an der Gesamtverbrennung die Zusammenhänge zwischen Wirkungsgrad und Mitteldruck der Teillasten. Bemerkenswert ist das starke Ansteigen des Wirkungsgrades mit dem Luftüberschuß. Der Höchstdruck bei Teillasten nimmt bei Gleichdruckverbrennung nicht ab. Bei gemischter Verbrennung verringert er sich nach Bild 3 mit der Belastung umso mehr, je größer der Anteil der Gleichraumverbrennung ist. Das kann für Motoren, die viel mit Teillasten arbeiten müssen, einen größeren Gleichraumteil in der Verbrennung wünschenswert machen.

Im allgemeinen soll eine Annäherung an die Gleichdruckverbrennung angestrebt werden. Sie kann allerdings mit den heutigen Verbrennungsverfahren im allgemeinen nicht erreicht werden.

Der Gleichdruckverbrennung entsprechen Brenngesetze nach Bild 4. Sie sind annähernd dreieckförmig und umso kürzer und steiler, je höher der Verdichtungsdruck, also der Höchstdruck wird. Gemischte Verbrennung mit konstantem Höchstdruck und verschiedenen Verdichtungsverhältnissen erfordern Brenngesetze nach Bild 5. Je größer der Gleichraumteil ist, desto niedriger muß das Verdichtungsverhältnis gewählt werden, desto schlechter ist, wie früher gezeigt wurde, der Wirkungsgrad.

Berücksichtigt man auch die Forderung nach einer begrenzten Geschwindigkeit des Druckanstieges, so ergeben sich an Stelle der reinen Gleichraumverbrennung Brenngesetze nach Bild 6. Die Wirkungsgrade werden durch die längere Dauer der Verbrennung unbedeutend kleiner, der Höchstdruck wird nur wenig beeinflusst.

Für konstanten Höchstdruck und verschiedene Verdichtungsverhältnisse sowie einer zulässigen Geschwindigkeit des Druckanstie-

ges von $\frac{dp}{d\alpha} = 2 \text{ at/}^\circ\text{KW}$ sind die in Bild 7 dargestellten Brenngesetze erforderlich. Diese stellen die Idealform des Brenngesetzes mit gemischter Verbrennung dar und sind dann anzustreben, wenn aus irgendwelchen Gründen (z. B. vermindertem Höchstdruck bei Teillasten) Gleichdruckverbrennung nicht erwünscht ist.

Die bisherigen Ausführungen galten für den selbstansaugenden Motor mit einem Anfangsdruck von $0,95 \text{ kg/cm}^2$. Zieht man auch eine Veränderung des Anfangsdruckes in Betracht, demnach also Aufladung und theoretisch auch Drosselung, so zeigt sich aus Bild 8, daß der erreichbare Mitteldruck bei festgelegtem Höchstdruck ganz außerordentlich vom Brenngesetz abhängt. Mit Gleichdruckverbrennung lassen sich bei erträglicher Triebwerksbeanspruchung hohe Mitteldrücke erzielen.

Bild 9 läßt erkennen, daß hohe Mitteldrücke im allgemeinen infolge der Höchstdruckgrenze mit niedrigem Wirkungsgrad erkauft werden müssen, denn hohe Aufladung muß durch eine Verringerung des Verdichtungsverhältnisses ermöglicht werden. Für einen gegebenen Mitteldruck ist der höchste Wirkungsgrad wieder durch das Gleichdruckbrenngesetz erreichbar. Eine Steigerung des Höchstdruckes wirkt sich ungefähr verhältnißmäßig auf den Mitteldruck aus, der Wirkungsgrad bleibt annähernd gleich.

Aus der Untersuchung lassen sich zusammenfassend zur Erzielung hohen Wirkungsgrades bei selbstansaugenden und aufgeladenen Motoren folgende Richtlinien aufstellen:

1. Durch eine verbesserte Beherrschung des Verbrennungsablaufs sind Diagramme mit geringer Drucksteigerung gegenüber dem Verdichtungsdruck anzustreben.
2. Durch Entwicklungsarbeit vor allem an den Lagern und am Triebwerk sind die zulässigen Höchstdrücke im Zylinder hinaufzusetzen.

Eine Voraussetzung für die Klärung der Zusammenhänge zwischen Verbrennungsbedingungen und Brenngesetz ist die Bestimmung des letzteren an der wirklichen Maschine. Die Kenntnis des Brenngesetzes ermöglicht weiter auch eine Teilung der inneren Verluste in der Maschine und damit eine verfeinerte Wertung von motorischen Verbrennungsverfahren und die Gewinnung von Erkenntnissen, die zu einer Verbesserung des Gütegrades und damit des Verbrauchs ausgenutzt werden können.

Über eine einschlägige Untersuchung, an welcher in meinem Institut gearbeitet wird, will ich im folgenden kurz berichten:

Die inneren Verluste im Motor, deren Auswirkungen im Gütegrad zusammengefaßt sind, bestehen:

1. Aus den Verlusten durch unvollkommene Verbrennung. Diese waren bei den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen im allgemeinen klein und werden daher in der Darstellung vernachlässigt.
2. Durch die Verluste infolge des nicht zeitgerechten Ablaufs der Verbrennung. Als Vergleichsprozeß nimmt man den Gleichraumprozeß an, der den höchsten Wirkungsgrad bei gegebenem Verdich-

tungsverhältnis gibt. Die verhältnismäßige Abminderung des Wirkungsgrades durch den von der Gleichraumverbrennung abweichenden Verlauf kann als Gleichraumgrad η_g bezeichnet werden.

3. Aus den Verlusten durch den Wärmeübergang an die Wände. In Bezug auf diese ist von Bedeutung:

- a) die Menge der übergegangenen Wärme als Maß für die Wärmebelastung der Bauteile der Maschine während der Arbeitsvorgänge,
- b) die Wirkungsgradverminderung, die man ebenfalls als Verhältniszahl η_w einführt und als Wandwirkungsgrad bezeichnet.

4. Aus den bei eingeschnürten Brennräumen im Zylinder entstehenden Strömungsverlusten, die man zweckmäßig durch ein subtraktives Glied $\Delta\eta_{st}$ berücksichtigt.

Der Innenwirkungsgrad ist demnach:

$$\eta_i = \eta_v \cdot \eta_g \cdot \eta_w - \Delta\eta_{st}$$

Die Untersuchung wurde mit der Bestimmung der Brenngesetze und der Verlustteilung an einem Einzylinderviertakt Dieselmotor von 2 ltr Hubraum und einer Drehzahl bis zu 1500 U/min begonnen. In dem Motor können verschiedene Verbrennungsverfahren (direkte Einspritzung, Vorkammer, Wirbelkammer, Luftspeicher) verwirklicht werden. Die Einrichtungen dafür wurden bewährten Ausführung nachgebildet, erreichen aber mangels Feinheit der Abstimmung, für die uns die Zeit fehlte, deren Mitteldruck und Verbrauchswerte nicht. Die Durchführung von Untersuchungen verschiedener Verbrennungsverfahren an einer Maschine hat den Vorteil, daß die Unterschiede in den Verfahren besonders klar hervortreten.

Die Grundlage für die Bestimmung des Brenngesetzes und für die Verlustteilung bilden sorgfältig durchgeführte Brennstoff- und Luftverbrauchsmessungen und eine genaue Indizierung der Maschine. Dazu wurde der DVL-Glimmlampenindikator verwendet, der sich in dem hier in Betracht kommenden Drehzahlbereich als sehr brauchbares, wenn auch nicht ganz einfach zu bedienendes Gerät erwies.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse an drei verschiedenen typischen Verbrennungsverfahren: einem Verfahren mit direkter Einspritzung, einem Vorkammer- und einem Wirbelkammerverfahren. Die Höchstwerte des Innenwirkungsgrades liegen nach Bild 10 bei den drei untersuchten Verfahren in ungefähr gleicher Höhe.

Bild 11 zeigt die Gleichraumwirkungsgrade. Mit steigender Belastung tritt ein Abfall ein, der, wie sich z. B. aus den Brenngesetzen Bild 12 ergibt, durch Nachbrennen bei kleinem Luftüberschuß verursacht ist.

Große Unterschiede bestehen im Wärmeübergang. Die Vorkammer liegt infolge der großen Strömungsenergie und der dadurch verursachten heftigen Gasbewegung im Zylinder nach Bild 13 an ungünstigsten. Natürlich ist auch der Wandwirkungsgrad (Bild 14) bei der Vorkammer am niedrigsten. Die Reihung: direkte Einspritzung, Wirbelkammer und Vorkammer entspricht ungefähr den Strömungsenergien, die für die Wirbelung aufgewendet werden.

Der Strömungsverlust (Bild 15) ist nur bei der Vorkammer so groß, daß er erfaßt werden konnte. Die Größe dieses Verlustes hängt davon ab, wann die kinetische Energie wieder in Wärme umgesetzt wird und kann nur abgegrenzt, aber nicht genau festgelegt werden. Der Verlust ist bei großen Belastungen im vorliegenden Fall nicht erheblich, verschlechtert aber doch den Wirkungsgrad merkbar. Die untersuchte Wirbelkammer hatte verhältnismäßig große Überströmöffnungen, daher nur sehr kleine Strömungsverluste, die nicht gesondert nachgewiesen wurden. Bild 16 zeigt den Einfluß des Zündpunktes bei den drei Verfahren. Ein Vorrücken verbessert im allgemeinen den Gleichraumgrad, erhöht jedoch die Verluste durch den Wärmeübergang und damit auch die Wärmebelastung des Motors. Durch diese gegenläufigen Einflüsse entsteht ein Höchstwert des Innenwirkungsgrades, der in den vorliegenden Fällen annähernd bei einem Verbrennungsbeginn im Totpunkt liegt.

Die Brenngesetze der untersuchten Systeme (Bild 17) weichen erheblich von den idealen Brenngesetzen ab. Die direkte Einspritzung liegt infolge der schlagartigen Zündung am ungünstigsten. Eine Zusammenstellung eines idealen Brenngesetzes mit gleichem Höchstdruck und begrenzten Druckanstieg und eines gemessenen Brenngesetzes in Bild 18 zeigt die Unterschiede deutlich. Das Verhältnis der Gleichraumwirkungsgrade des idealen Brenngesetzes und des wirklichen Brenngesetzes ist 0,96. Es könnte demnach durch eine bessere Steuerung der Verbrennung bei gleichem Höchstdruck und gleicher Verdichtung eine Verbesserung des Brennstoffverbrauches um 4 % erzielt werden. Eine weitere Verbesserung ließe sich erreichen, wenn durch Verwirklichung eines Dreieckbrenngesetzes, wie es der Gleichdruckverbrennung entspricht, die Verdichtung bis zum Höchstdruck möglich würde.

Auch Brenngesetze, die F. A. F. Schmidt an verschiedenen Dieselmotoren bestimmt hat, zeigen im allgemeinen einen wenig befriedigenden Verlauf. Bei diesen, wie bei unseren Messungen, nehmen die anfangs hohen Verbrennungsgeschwindigkeiten im Laufe der Verbrennung ab, während gerade der umgekehrte Verlauf erwünscht wäre. Die Beherrschung des Verbrennungsablaufes mit neuzeitlichen Verfahren ist demnach noch ungenügend und erreicht im allgemeinen noch nicht das, was man früher mit der Lufteinblasung - allerdings bei mäßigen Drehzahlen - erzielen konnte.

Eine Kette von Zusammenhängen führt von der Ausbildung der Einspritzteile zum Einspritzgesetz (dem zeitlichen Verlauf der Einspritzung) und von diesen über das Brenngesetz zum Druckverlauf, Wirkungsgrad und Mitteldruck. Die Glieder bis zum Einspritzgesetz sind durch die technische Erkenntnis gut erfaßt, die Einspritzung kann weitgehend beherrscht werden. Auch die Zusammenhänge zwischen Brenngesetz, Druckverlauf, Wirkungsgrad und Mitteldruck sind, wie ich Ihnen zeigen konnte, abgesehen vom zeitlichen Verlauf des Wärmeübergangs, als klares Wissensgut vorhanden. Im schwierigsten Gebiet zwischen Einspritzgesetz und Brenngesetz klafft jedoch sowohl in der praktischen Beherrschung der Verbrennung wie auch in Bezug auf den Einblick in die Vorgänge eine große Lücke, bei deren Schließung Entwicklung und Forschung zusammenarbeiten müssen.

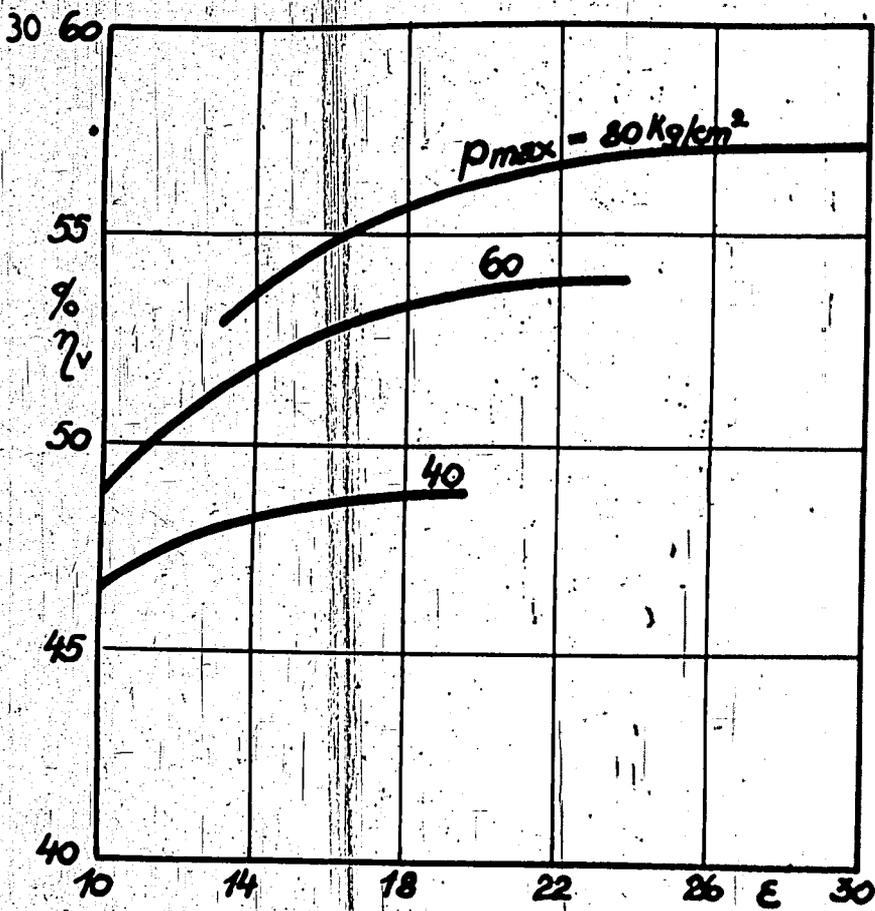


Bild 1. Wirkungsgrad des vollkommenen Motors η_v bei gegebenem Höchstdruck $\lambda = 1,4$. Endpunkt der Verdichtung entspricht dem eines wirklichen Diagramms mit einer Verdichtungsline $p \cdot v^{1,4} = \text{konst.}$

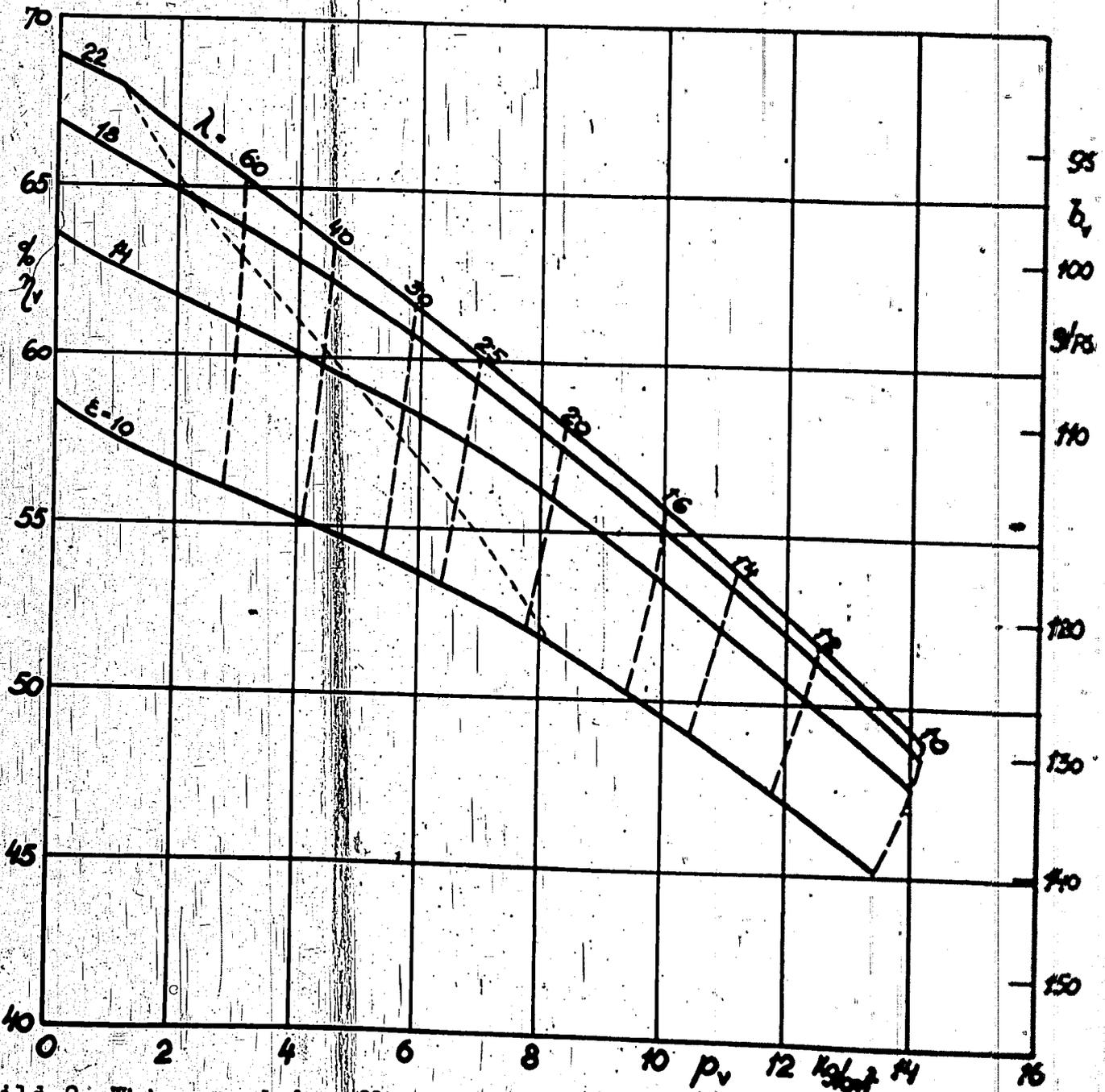


Bild 2. Wirkungsgrad des vollkommenen Motors η_v bei einem Höchstdruck von 60 kg/cm^2

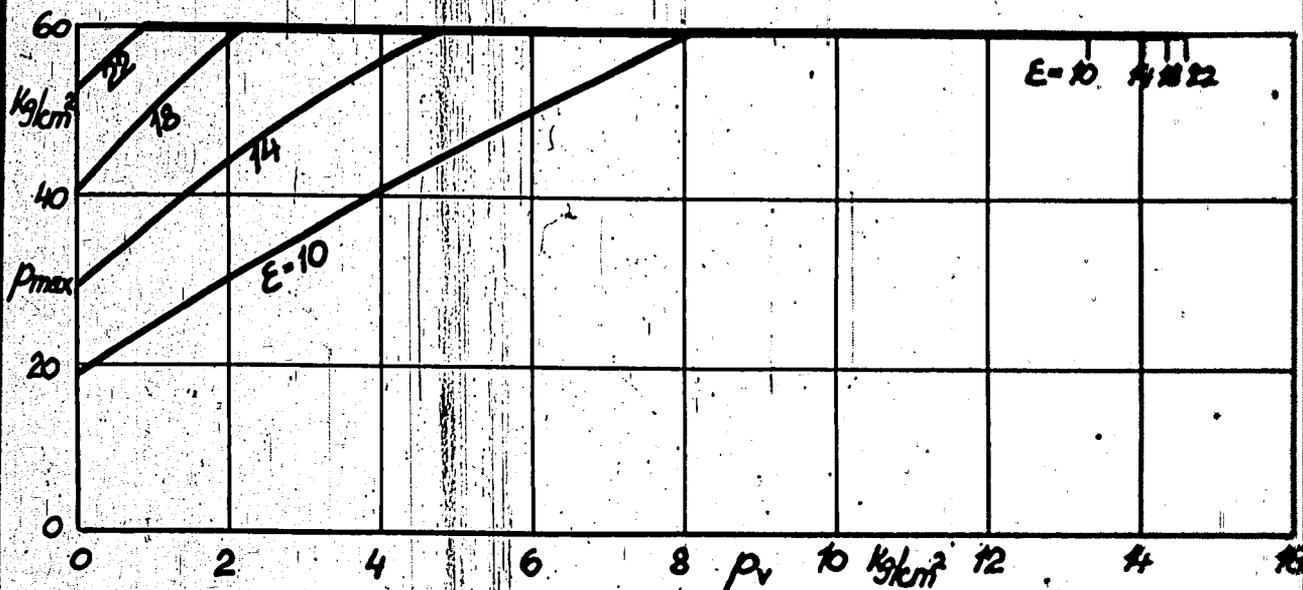


Bild 3. Verlauf des Höchstdruckes bei Teillasten.

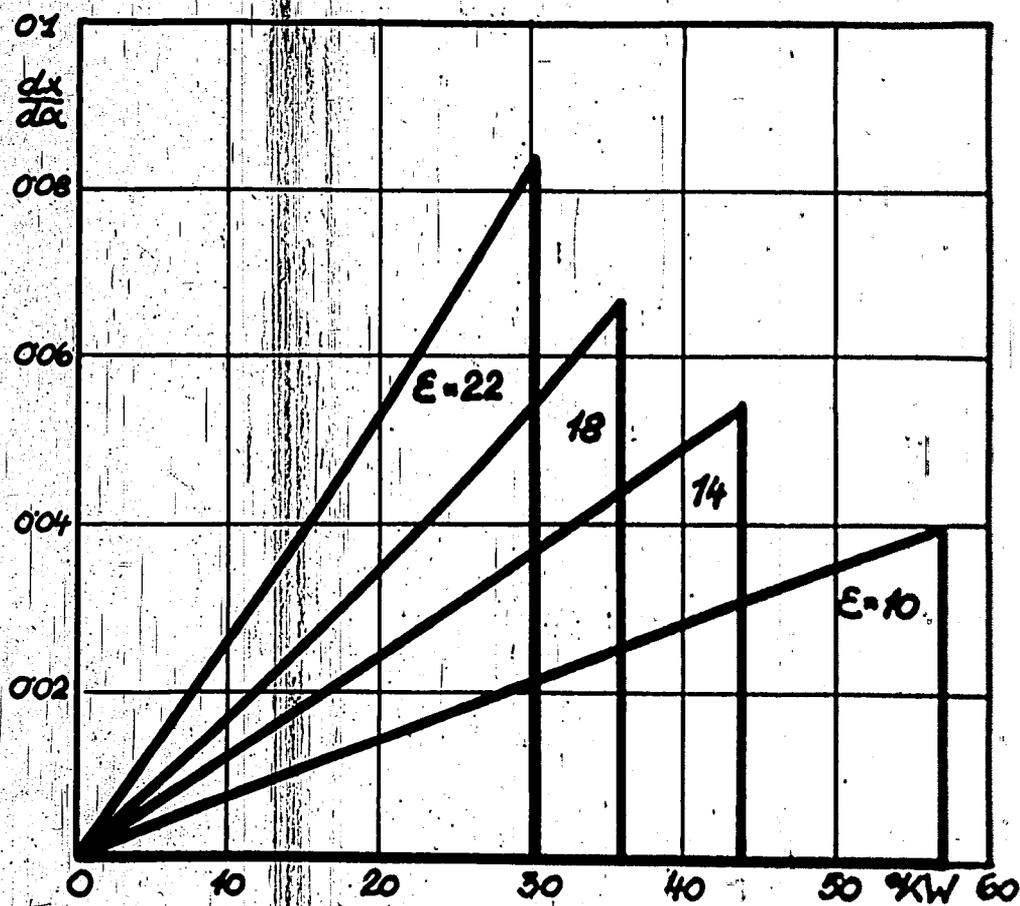


Bild 4. Brenngesetze für Gleichdruckverbrennung.

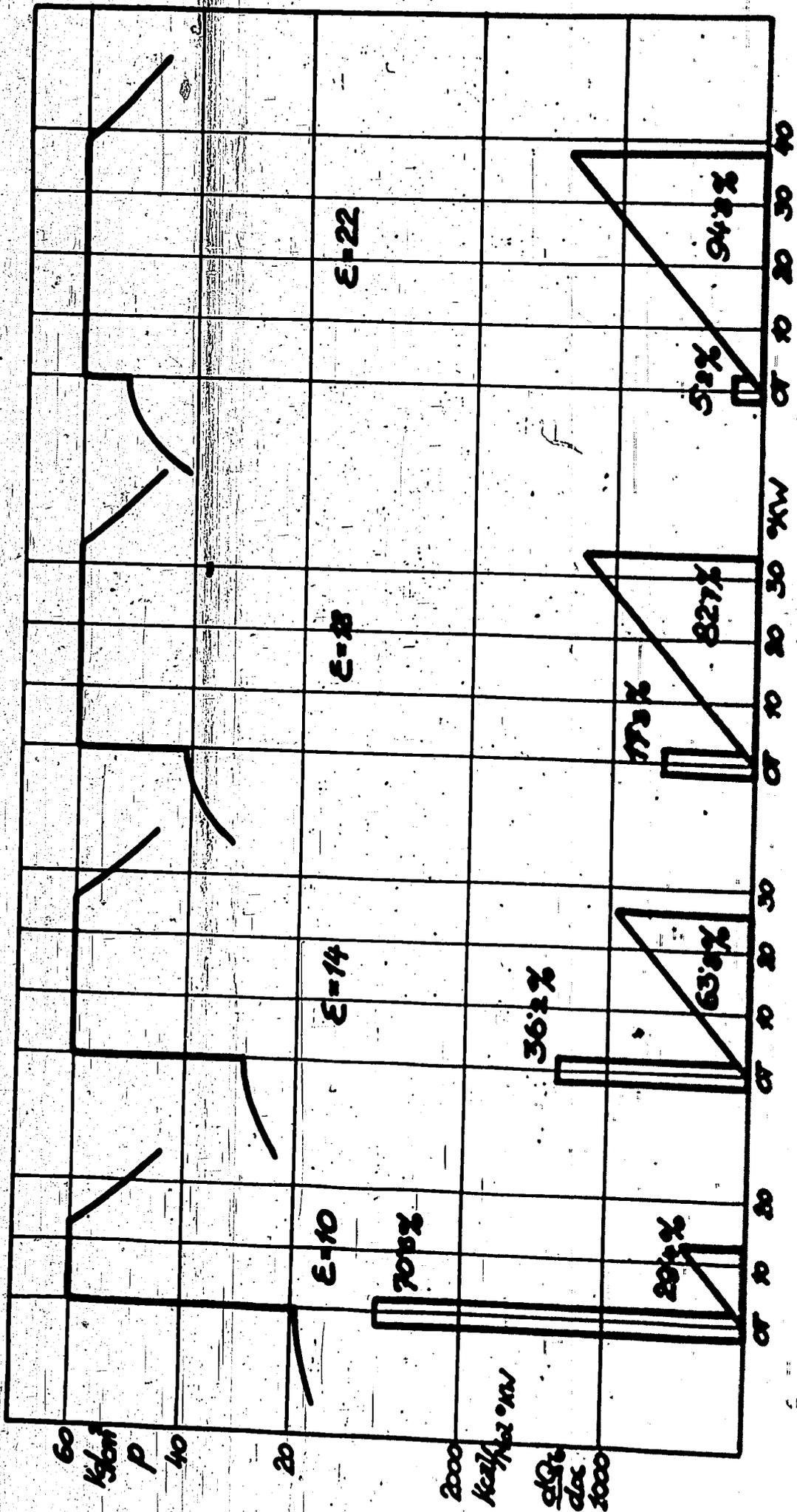


Bild 5. Druckverlauf und Brenngesetz für gemischte Verbrennung mit einem Höchstdruck von 60 kg/cm².

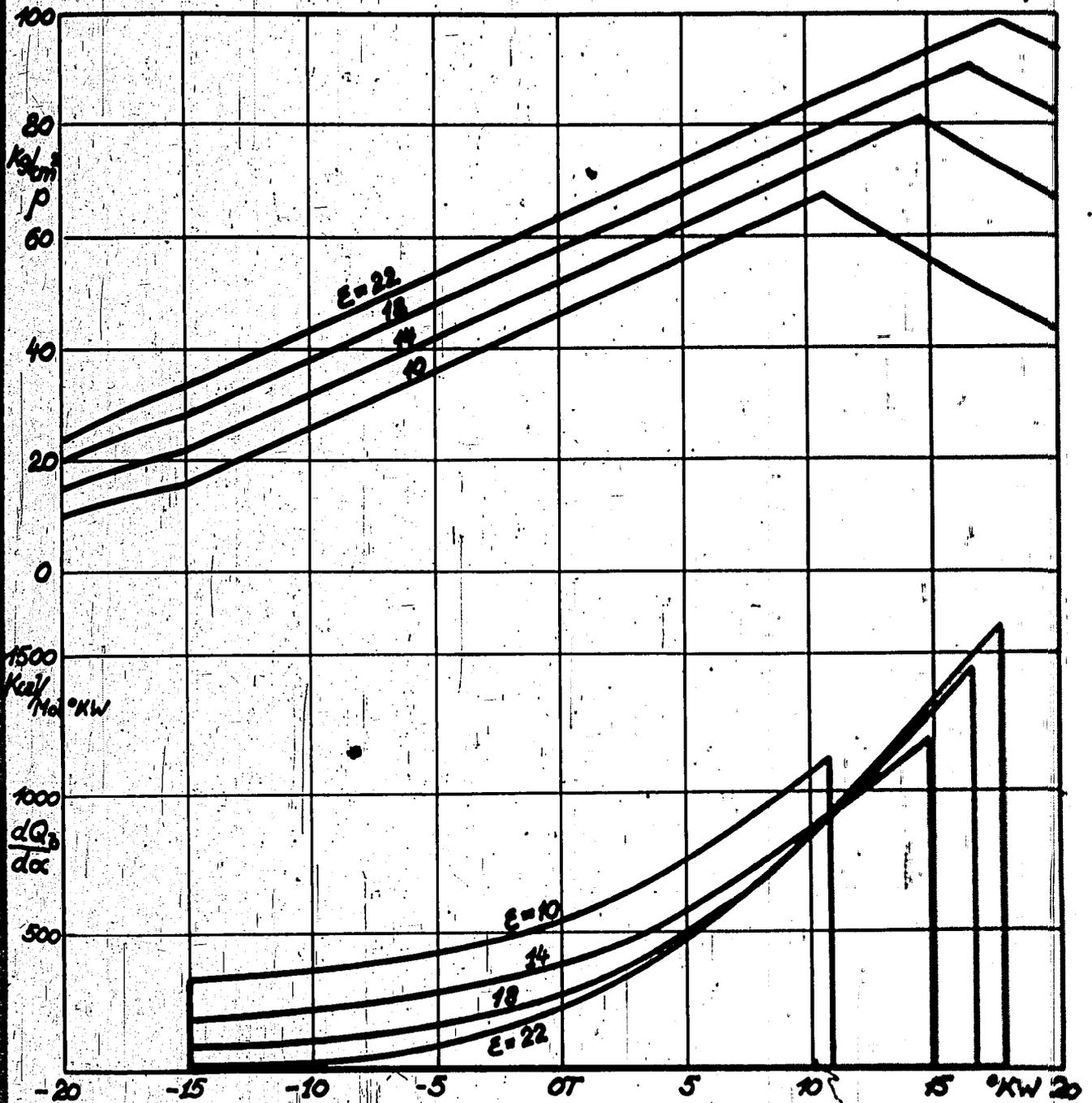


Bild 6. Brenngesetze mit konstantem Druckanstieg

$$\frac{dp}{d\alpha} = 2 \text{ at}/^{\circ}\text{KW}.$$

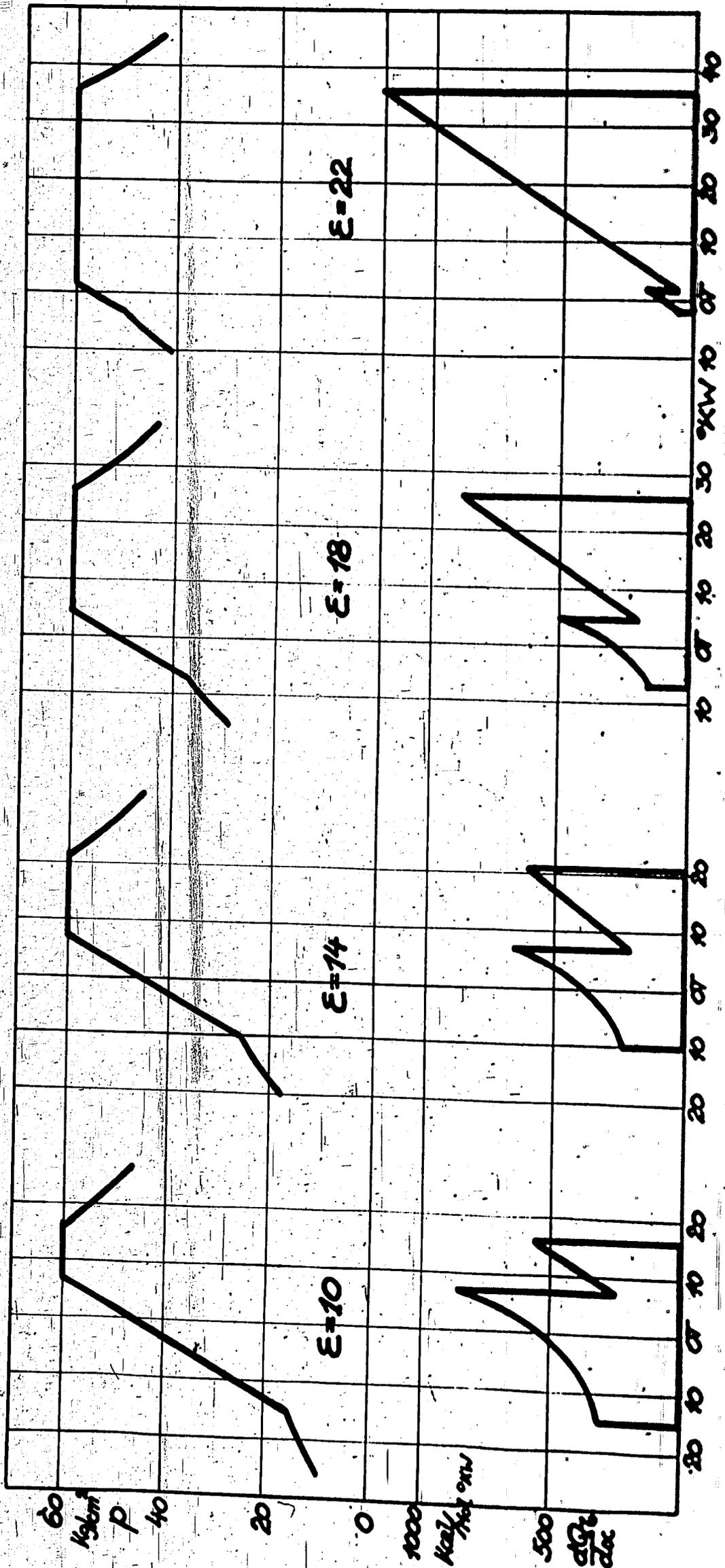


Bild 7. Brenngesetze mit konstantem Druckanstieg $\frac{dp}{d\alpha} = 2 \text{ at/cm}$ und Gleichdruckteil.

Bild 8. Mitteldruck des vollkommenen Motors p_v und Anfangsdruck der Verdichtung p_1 bei Gleichraum- und Gleichdruckverbrennung mit einem Höchstdruck $p_{max} = 60 \text{ kg/cm}^2$.

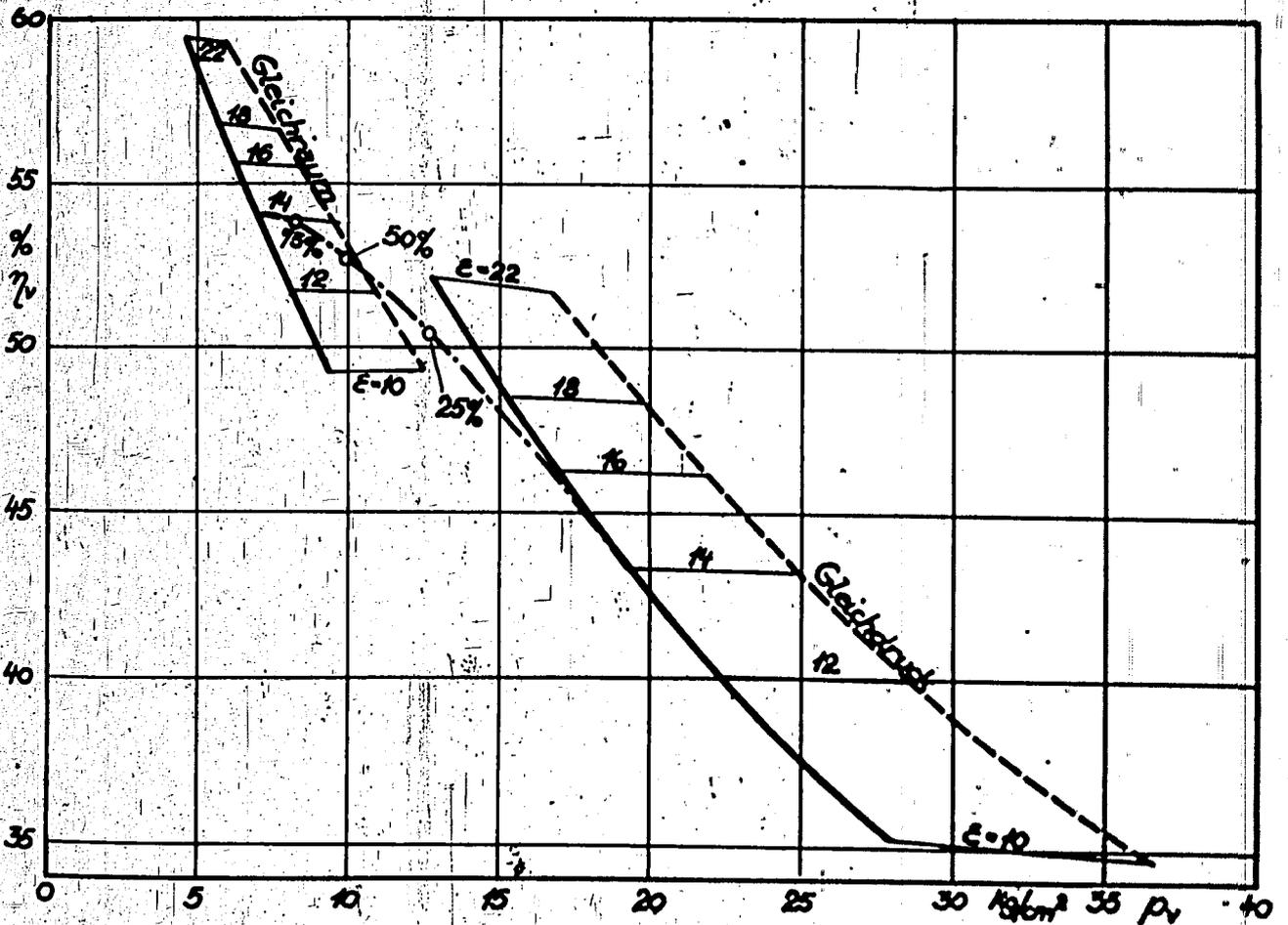
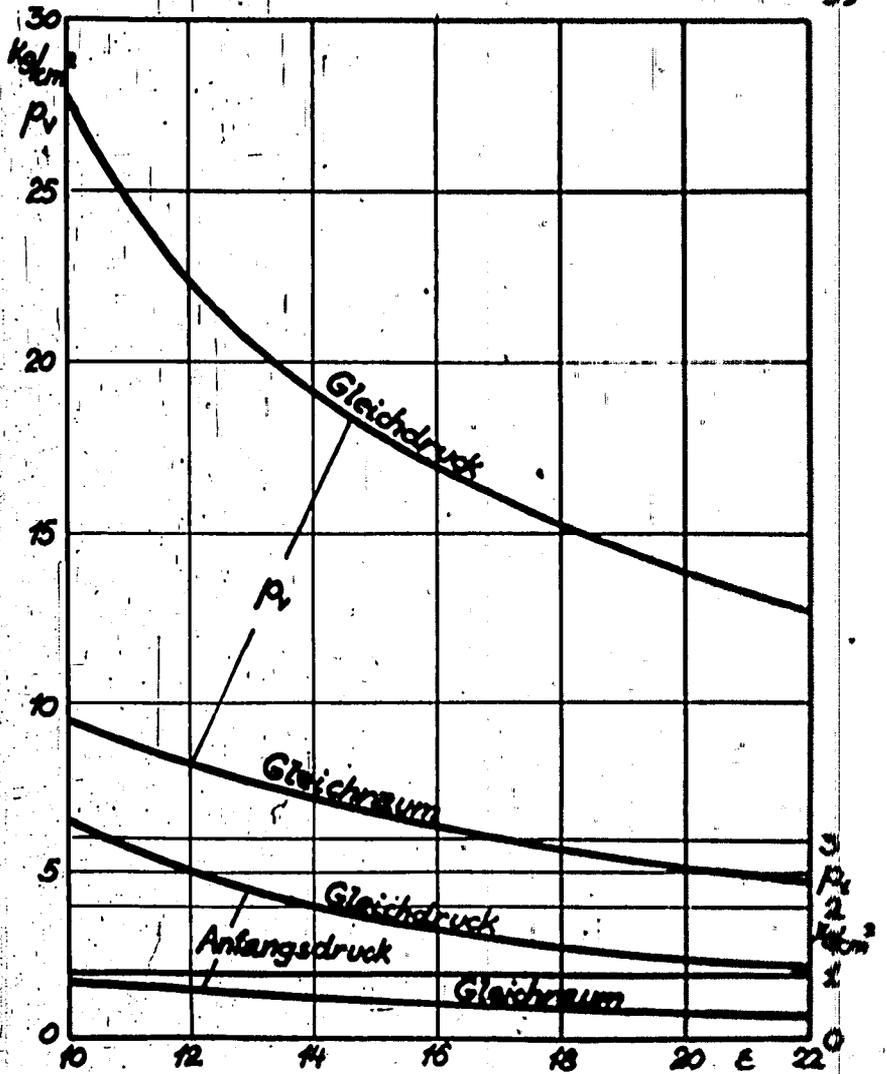


Bild 9. Zusammenhänge zwischen η_v und p_v für einen Höchstdruck von 60 kg/cm^2 und 80 kg/cm^2 . Die Zahlen bei den Punkten auf den strichpunktierten Linien ($\epsilon = 14$) bedeuten den Anteil an der Gesamtwärme, der durch die Gleichraumverbrennung erzeugt wird.

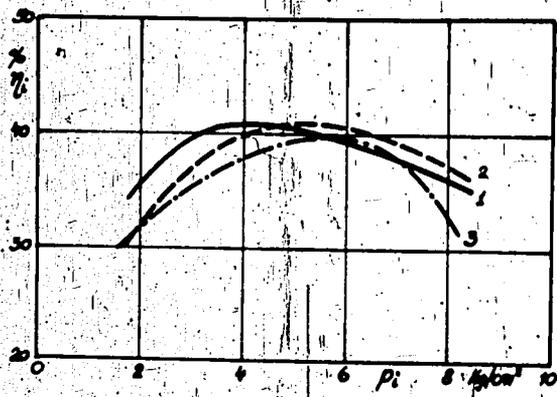


Bild 10. Innenwirkungsgrade η_i .

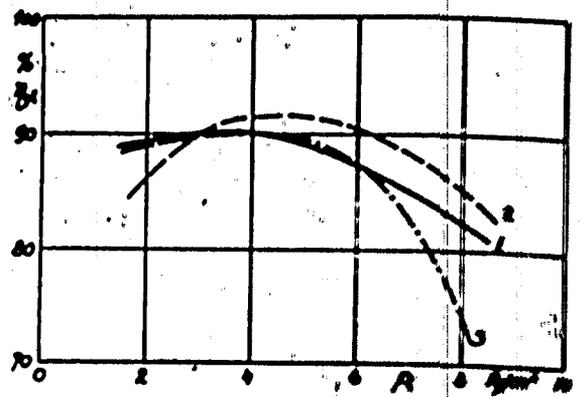


Bild 11. Gleichraumgrade η_{gl} .

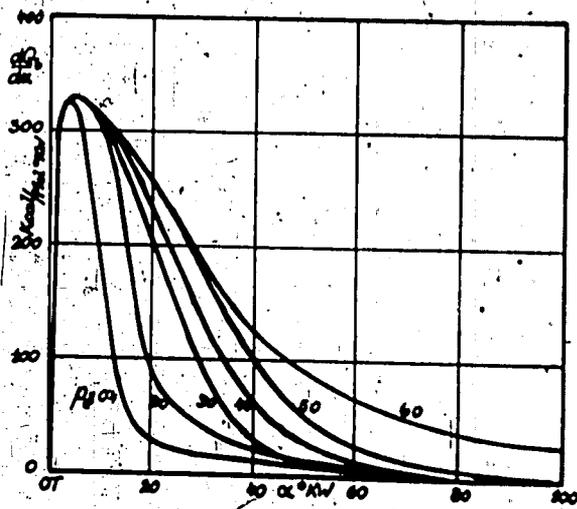


Bild 12. Brenngesetze bei Teillasten ($p_e = 0,4 + 6 \text{ kg/cm}^2$). Vorkammer mit $\epsilon = 18$.

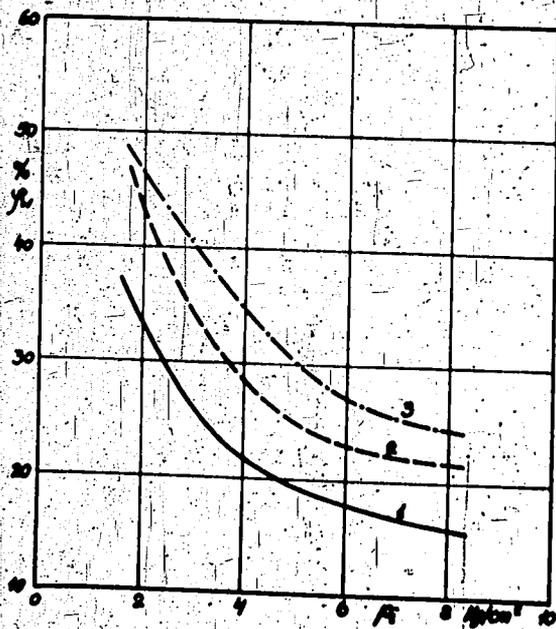


Bild 13. Während der Arbeitsvorgänge an die Wände übertragene Wärme in Bruchteilen φ_w der Verbrennungswärme.

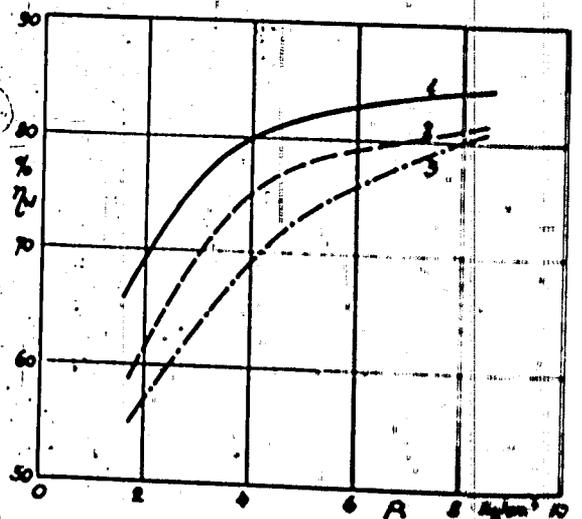


Bild 14. Wandwirkungsgrade η_w .

Bild 15. Bereich des Wirkungsgradverlustes $\Delta\eta_{st}$ durch die Strömung im Zylinder. Vorkammer.

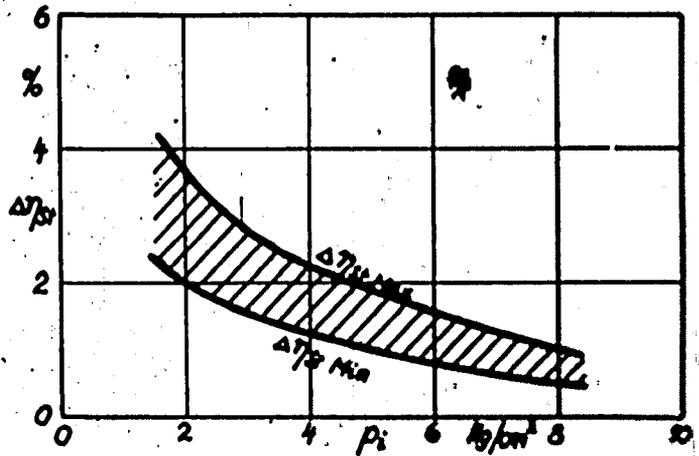
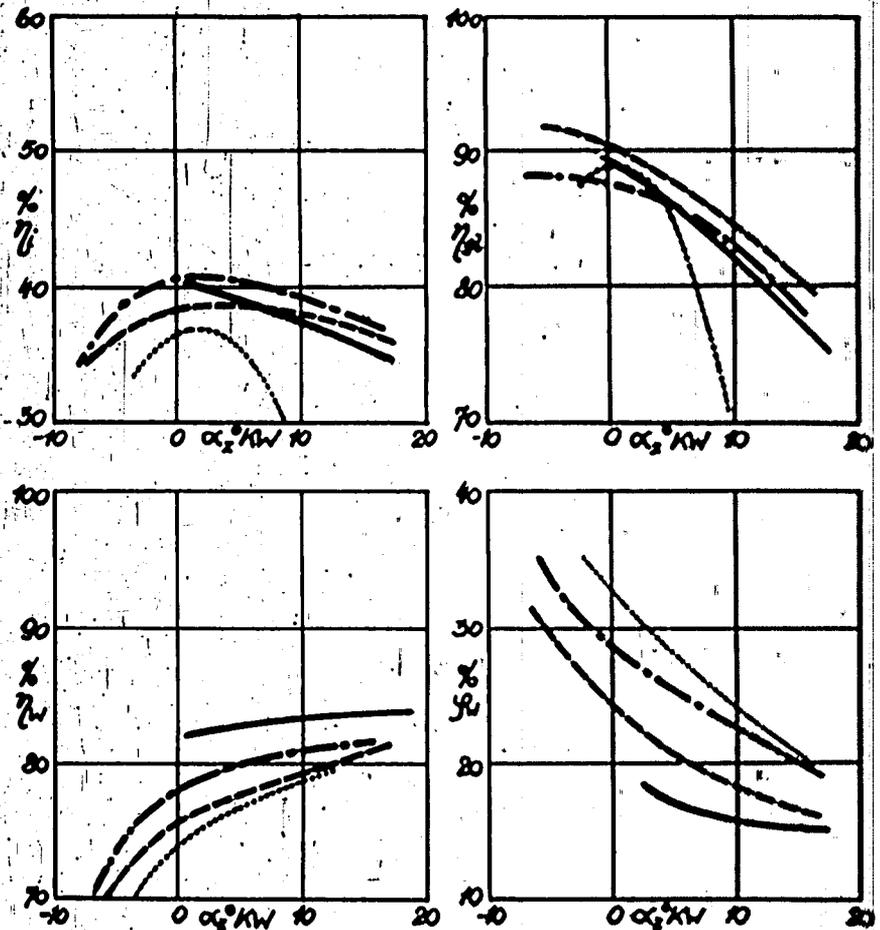
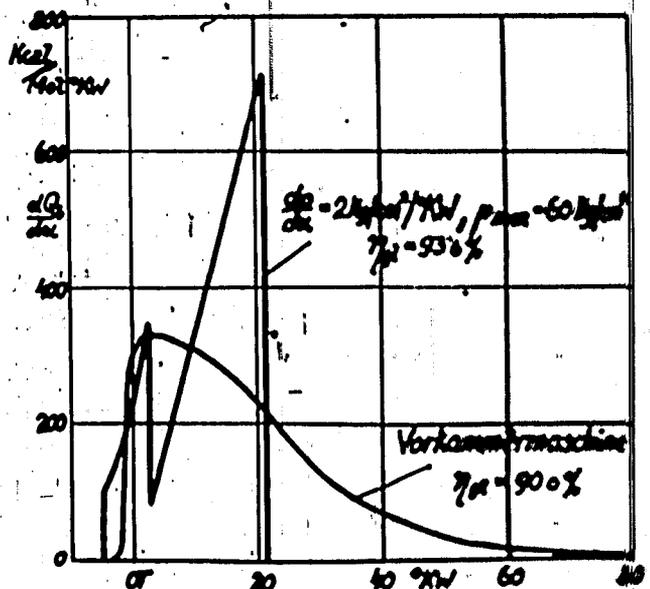


Bild 16. Teilwirkungsgrade bei Anordnung des Zündzeitpunktes. $p_e = 4,0 \text{ kg/cm}^2$.



Änderung des Zündzeitpunktes. $p_e = 4,0$. 1—Direkte Einspritzung, 2---Wirbelkammer, 3---Vorkammer, 4----Luftspeicher.

Bild 18. Gegenüberstellung eines gemessenen und eines idealen Verbrennungsgesetzes für gleichen Höchstdruck.



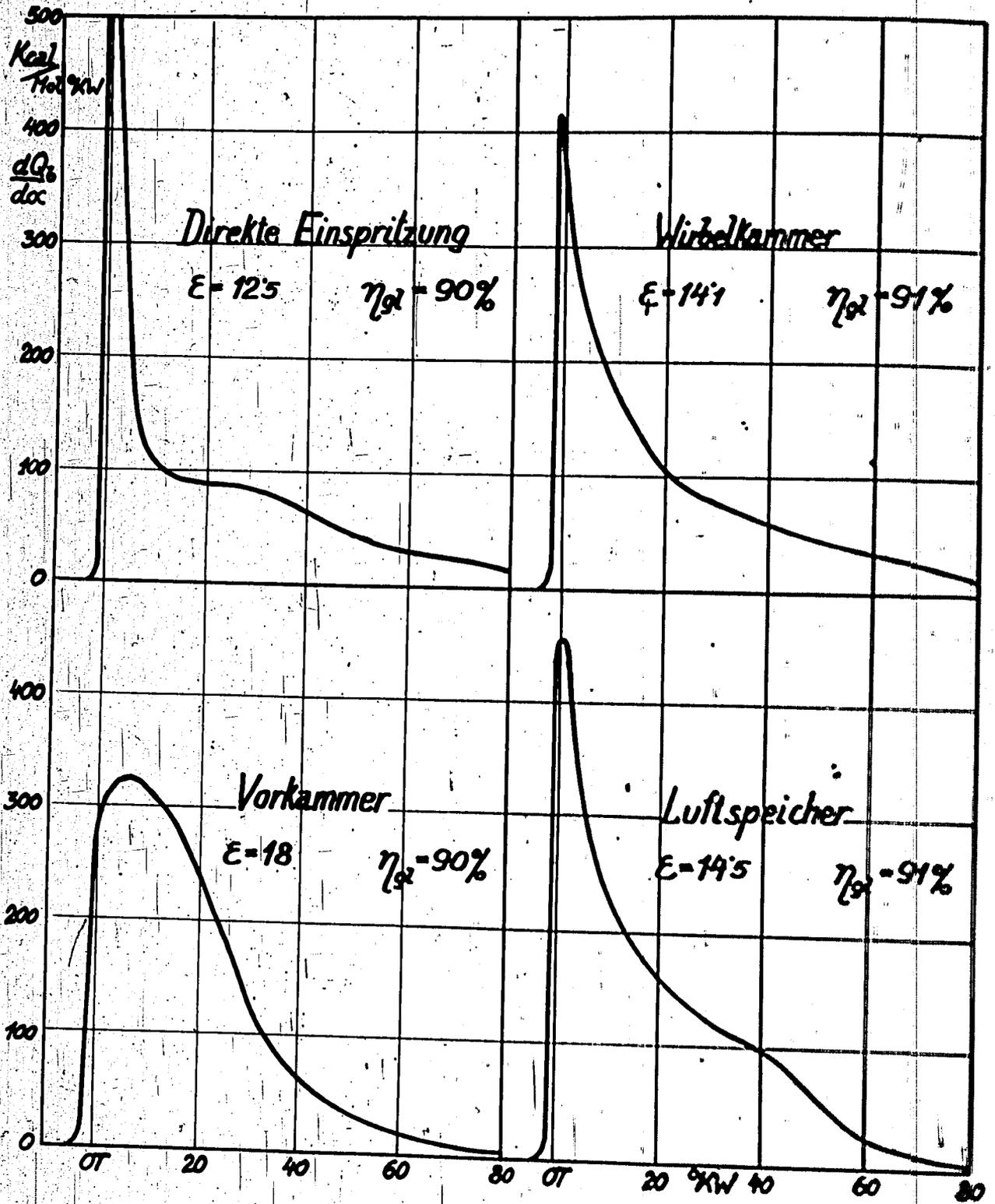


Bild 17. Brenngesetze für $p_1 = 5,8 \text{ kg/cm}^2$.