

bisher im Gasmaschinenbau gemachte Erfindung ist. Drei Merkmale sind es, durch die diese Maschine sich von den vorhergehenden unterscheidet, nämlich:

1. das Gasluftgemisch wird vor der Entzündung verdichtet,
2. die Entzündung findet im Totpunkte statt, und
3. die Maschine dient während eines Hin- und Herganges als Verdichtungspumpe für das Gasluftgemisch.

Wenngleich das Viertaktsystem an sich schon von dem Eisenbahningenieur Beau de Rochas 1862 beschrieben worden war, muß Otto doch das Verdienst bleiben, diese Idee praktisch verwirklicht zu haben.

Wenige Jahre später wurden schon Versuche gemacht, die Viertaktmaschine dadurch in eine Zweitaktmaschine umzuwandeln, daß die Ladung durch eine besondere Pumpe komprimiert und in den Zylinder gedrückt wird. Auch entstanden in jener Zeit die Maschinen, bei denen mit Benzin und Petroleum karburierte Luft als Betriebsstoff angewendet wird. Ferner fallen in diese Zeit die Versuche Daimlers, Gewicht und Größe der Motoren durch Anwendung eines sehr reinen Gasgemisches sowie durch Einführung einer sehr hohen Umdrehungszahl der Kurbelwelle beträchtlich zu verringern. Immer noch wurden aber die Gasmaschinen nur für kleine Leistungen gebaut. Noch 1894 galt eine Gasmaschine von 160 PS für etwas Außergewöhnliches. Aber auch dies änderte sich bald durch die Nutzbarmachung der Hochofen- und Koksofengase sowie durch die Anwendung der Generator- und Kraftgase, wodurch die Industrie der Großgasmaschinen geschaffen wurde. Schließlich sei noch die Gleichdruckmaschine erwähnt, um deren Ausbildung sich besonders Diesel (1897) verdient gemacht hat. In allerneuester Zeit wird auch an der Schaffung einer brauchbaren Gasturbine lebhaft gearbeitet.

### Allgemeines.

Im Gegensatz zu den Dampfmaschinen werden bei den Gasmaschinen die in den Brennstoffen schlummernden Wärmemengen erst an den Stellen geweckt, an denen sie in nutzbringende Arbeit umgesetzt werden sollen, nämlich im Innern des Arbeitszylinders. Es werden also bei der Gasmaschine die heißen Verbrennungsgase unmittelbar zur Arbeitsleistung verwendet, während sie bei der Dampfmaschine erst zur Erzeugung eines Zwischenmittels, des Dampfes, dienen. Schon hieraus geht hervor, daß die Gasmaschine in wärmetechnischer Hinsicht vorteilhafter arbeiten muß; denn alle Verluste, die in der Dampfmaschine bei der Erzeugung und Fortleitung des Dampfes entstehen, fallen bei ihr fort. Ferner läßt sich durch gasförmige Brennstoffe eine viel vollkommene Verbrennung im Zylinderinnern erreichen als durch die zur Kesselfeuerung gewöhnlich benutzten festen Brennstoffe.

Die für den Betrieb der Verbrennungsmaschinen dienenden Gase werden entweder vorhandenen Gasanstalten entnommen oder in eigens für die Maschinen bestimmten Anlagen erzeugt oder als Nebenprodukt gewonnen. Vorzugsweise werden benutzt: Steinkohlengas (Leuchtgas), Kraftgas (Dowsongas, Generatorgas), Hochofengichtgas und Koksofengas, Braunkohlen- und Torfgas. Azetylen findet nur vereinzelt für kleinere Maschinen Verwendung.

Bei allen Verbrennungsmaschinen wird jetzt das Gasgemisch vor der Zündung verdichtet, wodurch die Arbeitsfähigkeit des Gases besser ausgenutzt wird, wie aus folgender Betrachtung hervorgeht. Zwei Mengen eines explosibeln Gasgemisches von gleicher Zusammensetzung und gleichem Gewicht seien in Gefäße von 2 und 1 Liter Inhalt eingeschlossen, derart, daß in dem größeren eine Spannung von 1 Atmosphäre, in dem kleineren eine Spannung von 2 Atmosphären vorhanden ist. Entzündet man diese Gasgemische, dann wird in beiden Gefäßen annähernd dieselbe Drucksteigerung stattfinden, die etwa das Zehnfache betragen möge, so daß die Spannung im größeren Gefäß 10 Atmosphären, im kleineren 20 beträgt. Nimmt man an, daß die Verbrennungsgase in beiden Fällen sich unter Arbeitsverrichtung bis zu 1 Atmosphäre ausdehnen, so ist klar, daß das kleinere Volumen um so viel mehr Arbeit leisten kann, als bei der Expansion von 20 auf 10 Atmosphären entsteht. Von dieser Mehrarbeit würde nur die verhältnismäßig geringe

Arbeit abzuziehen sein, die vor der Entzündung zur Verdichtung des Gasgemisches von 1 auf 2 Atmosphären erforderlich war. Durch die Verdichtung wird das Gasluftgemisch auch zündfähiger; denn trotzdem sich Gas und Luft sehr gut miteinander mischen, ist es doch bei der geringen, hierfür zur Verfügung stehenden Zeit sehr leicht möglich, daß die Mischung die gewünschte Vollkommenheit nicht erreicht. Dieser Mangel wird durch die Verdichtung beseitigt, welche die einzelnen Gas- und Luftteilchen eng aneinander bringt, so daß sich die Zündung rascher von einem Teilchen zum anderen fortpflanzt. Infolgedessen können auch stärker verdünnte Gasgemische angewendet werden, was ein Sinken der Anfangstemperatur und damit der durch das Kühlwasser abgeführten Verlustwärme nach sich zieht. Schließlich geht die Verpuffung des verdichteten Gemisches in einem kleineren Raume vor sich als die des unverdichteten, wodurch wegen der kleineren Wandungsfläche die schädliche Wärmeableitung durch die Wandung herabgemindert wird.

Wesentlich für die Zündfähigkeit des Gases ist das richtige Mischungsverhältnis von Luft und Gas, das sich nach dem Heizwert des Gases richtet, d. h. nach der Wärmemenge, die 1 cbm Gas bei vollständiger Verbrennung entwickelt. Vgl. die nachstehende Tabelle.

Bezeichnung des Gases	Mischungsverhältnis in Raumteilen Gas : Luft	Gebräuchliche Verdichtungsspannung in Atmosphären	Verpuffungsspannung in Atmosphären
Leuchtgas . . . . .	1:6—1:7	3—4	12—18
Koksofengas . . . . .			
Fettgas . . . . .	1:1—1:2	8—12	15—22
Kraftgas . . . . .			
Gichtgas . . . . .			

Der Gasverbrauch ist abhängig von dem Heizwert des Gases und von der Maschinengröße. Er wird angegeben für die indizierte oder die effektive Leistung, und zwar in Kubikmetern für 1 Pferdestärke und für 1 Stunde. Bezogen auf die effektive Leistung beträgt der Gasverbrauch bei Maschinen von ungefähr 5—100 Pferdestärken für Leuchtgas 0,68—0,35, Koksofengas 1—0,75, Fettgas 0,35—0,3, Kraftgas 3,6—2,3, Gichtgas 3,8—2,8 cbm. Diese Angaben gelten für annähernd volle Belastung der Maschinen. Bei abnehmender Beanspruchung wächst der Gasverbrauch.

Neben den gasförmigen Brennstoffen finden auch flüssige Brennstoffe, wie Petroleum, Benzin, Spiritus, Paraffinöl usw., Verwendung, die jedoch vor der Verbrennung verdampft werden; hierauf vollzieht sich der Kreisprozeß in der Maschine ebenso wie bei den mit gasförmigen Brennstoffen betriebenen Maschinen. Der Verbrauch beträgt an Petroleum 0,55—0,2 Liter, an Benzin 0,35 bis 0,25 Liter, an Rohspiritus 0,5—0,42 Liter für jede effektive Pferdestärke und Stunde.

Nach Vorstehendem verbraucht eine kleine Gasmaschine für die effektive Stundenpferdestärke etwa 0,6 cbm Leuchtgas. Wird der Heizwert des Leuchtgases zu 5000 WE angenommen, so sind das  $0,6 \cdot 5000 = 3000$  WE. Andererseits entspricht aber eine Stundenpferdestärke einer Wärmemenge von 637 WE. Beides verglichen, ergibt einen thermischen Wirkungsgrad  $\frac{637}{3000} = 0,212 =$  rund 21 Proz.

Es wird also etwa  $\frac{1}{5}$  der im Brennstoff enthaltenen Wärmemenge in Arbeit umgesetzt, während der Rest verloren geht. An sich ist diese Wärmeausnutzung ungünstig, aber im Vergleich mit den Dampfmaschinen, bei denen etwa 10—17 Proz. der im Brennstoff aufgespeicherten Wärme in Arbeit umgesetzt werden, ist sie als gut zu bezeichnen. Denn der vorstehend berechnete Wirkungsgrad bezieht sich auf kleine Gasmaschinen und stellt sich bei den großen bedeutend besser. Wenn es trotzdem der Gasmaschine nicht gelungen ist, die Dampfmaschine aus dem Felde zu schlagen, so liegt das daran, daß der Erwerber der Maschine nicht nach deren thermischen Wirkungsgrade fragt, sondern danach, wie hoch die Kosten für die effektive Stundenpferdestärke sind. Hierin ist aber die Gasmaschine der Dampfmaschine nur für kleine Leistungen überlegen; bei größeren Leistungen ist, abgesehen von dem Betriebe mit Kraftgasanlage, Gicht- und Koksofengasen, die Dampfmaschine vorteilhafter. Die beiden letztgenannten Gasarten wurden früher zur Beheizung von Dampfkesseln verwendet; bei ihrer unmittelbaren Ausnutzung in Großgasmaschinen hat sich herausgestellt, daß zur Erzielung derselben Leistung nur der dritte Teil der Gase

aufgewendet zu werden braucht, der sonst zur Beheizung der Dampfkessel verbraucht wird. Es ist also hier die Aufstellung von Gasmaschinen bedeutend vorteilhafter als die von Dampfmaschinen.

Da die Gasmaschine der Dampfmaschine für kleine Leistungen überlegen ist, ist sie besonders für Kleinbetriebe geeignet. Ein weiterer Vorteil liegt in den niedrigeren Anschaffungskosten. Nicht nur fällt die gesamte Kesselanlage fort, auch der Raum für diese sowie der Heizer werden gespart. Ferner ist sie stets betriebsbereit; ein Dampfkessel, der erst angeheizt werden müßte, ist nicht vorhanden, wenige Handgriffe genügen, um sie in und außer Betrieb zu setzen. Betriebspausen werden bei ihr weniger störend empfunden als bei der Dampfmaschine, da der hierbei entstehende Wärmeverlust nahezu Null ist. Andererseits ist ein Nachteil der Gasmaschine, daß sie ohne besondere Hilfsmittel nicht anläuft. Viel wichtiger und oft für die Wahl zwischen Gasmaschine und Dampfmaschine ausschlaggebend ist der Umstand, daß die Leistung der ersteren nicht annähernd in gleichem Maße steigerungsfähig ist wie die der letzteren. Bei einem vorübergehend größeren Kraftverbrauch als normal oder bei einer Betriebsvergrößerung ist bei der Dampfmaschine eine Erhöhung der Leistung in weiten Grenzen sehr einfach durch Vergrößerung der Zylinderfüllung zu erreichen. Bei der Gasmaschine ist dagegen nur eine verhältnismäßig geringe Steigerung der Leistung möglich. Schließlich erfordert die Gasmaschine trotz ihrer Einfachheit wegen der hohen Temperaturen, die in ihr vorkommen, eine sorgfältigere und sachgemäßere Bedienung.

Hinsichtlich der Bezeichnung und Einteilung der Verbrennungsmaschinen sind die mannigfaltigsten Vorschläge gemacht worden. Am einfachsten erscheint das nachstehende, von v. Ihering aufgestellte Schema.

A. Maschinen mit hin und her gehendem Arbeitsaufnehmer oder Hubmaschinen.

I. Verpuffungsmaschinen.

1. Viertaktmaschinen.

- a) ohne Verdichtung der Ladung,
- b) mit Verdichtung der Ladung.

2. Zweitaktmaschinen.

3. Sechstaktmaschinen.

II. Gleichdruckmaschinen.

1. Viertaktmaschinen.

2. Zweitaktmaschinen.

B. Maschinen mit umlaufendem Arbeitsaufnehmer oder Kreiselmaschinen.

I. Verbrennungsmaschinen mit einem oder mehreren umlaufenden Kolben.

II. Verbrennungsturbinen.

Von diesen Maschinen haben die weitaus größte Bedeutung die Hubmaschinen, und es sei daher im wesentlichen nur auf diese eingegangen.

Das gebräuchlichste Arbeitsverfahren ist der in den Fig. 194—202 erläuterte *Viertaktprozeß*, bei dem während zweier Kolbenhin- und -hergänge nur innerhalb eines einzigen Kolbenhinganges Arbeit auf den Kolben übertragen wird. Die vollständige Arbeitsperiode einer Zylinderseite der *Viertaktmaschine* verlangt also zwei Kurbelumdrehungen. Während des ersten Taktes, des Saughubes, bewegt sich der Kolben durch die Wirkung des Schwungrades in der Pfeilrichtung (Fig. 195) und saugt durch das Einlaßventil, das durch die Saugwirkung oder eine mechanische Steuerung geöffnet wird, das Gasgemisch an, bis der Zylinder damit gefüllt ist (Fig. 196). Der vor Anfang des Saughubes zwischen Kolben und Zylinderboden befindliche Raum wird Laderaum der Maschine genannt. Er ist, wenn sich das Einlaßventil öffnet, mit heißen Auspuffgasen gefüllt, die einerseits das anzusaugende Gemisch verdünnen, es andererseits aber erwärmen und hierdurch eine innigere Mischung und Verbesserung der Zündfähigkeit bewirken. Im Diagramm (Fig. 194) ist dieser Takt durch die Linie 1—2 versinnbildlicht. Bei dem nun folgenden zweiten Takte, dem Kompressionshube, sind Ein- und Auslaßventil geschlossen, so daß das eingeschlossene Gasgemisch von dem durch das Schwungrad rückwärts getriebenen Kolben komprimiert wird (s. Fig. 197 und 198 und im Diagramm Linie 2—3). Wie auseinandergesetzt, ist eine hochgetriebene Verdichtung für den Wirkungsgrad der Maschine

von großem Vorteil, doch darf diese nicht so weit getrieben werden, daß infolge der Kompressionswärme eine vorzeitige Selbstentzündung eintritt, da der hierdurch hervorgerufene heftige Stoß auf das Maschinengestänge dem Kolben entgegenwirkt und sogar zu einer Zerstörung der Maschine führen kann. Verdünntere Gasgemische und Brennstoffe von geringerem Heizwert erfordern höhere Verdichtung, die durch geeignete Bemessung des Laderaumes erreicht wird.

Der dritte Takt (Fig. 199 und 200) wird durch die im inneren Totpunkt erfolgende Entzündung des Gasgemisches eingeleitet; diese findet entsprechend der Kolbengeschwindigkeit und der Zündfähigkeit des Gemisches schon etwas vor dem inneren Hubwechsel statt, um rechtzeitige Spannungssteigerung zu bewirken. Die Verbrennung erfolgt zwar rasch, aber nicht explosionsartig und wird daher auch besser nicht als Explosion, sondern als *Verpuffung* bezeichnet. Wie aus der die Verbrennung darstellenden Linie 3—4 des Diagramms (Fig. 194) hervorgeht, erfolgt die Verbrennung nicht in unmeßbar kurzer Zeit; denn diese Linie ist ein wenig nach rechts geneigt, deutet also an, daß während des Verbrennungsvorganges eine Volumenvergrößerung stattgefunden hat, daß also eine wenn auch nur sehr kleine Zeit hierbei verstrichen ist. Gleichzeitig mit der Verpuffung tritt eine erhebliche Erhöhung der Spannung ein und im Anschluß hieran eine Expansion der heißen Verbrennungsgase (Linie 4—5 des Diagramms), bis kurz vor dem äußeren Totpunkte 6 bei 5 der Auspuff geöffnet wird. Der dritte Takt ist der einzige während des ganzen Verfahrens, bei dem Arbeit geleistet wird. Während des vierten Taktes (Fig. 201—202 und Linie 6—1 im Diagramm) tritt schon wieder die lebendige Kraft des Schwungrades in Tätigkeit und schiebt die expandierten Gase durch das geöffnete Auslaßventil in die Auspuffleitung.

Die Viertaktmaschinen werden meist einfachwirkend ausgebildet. Dieses und der Umstand, daß auf zwei Umdrehungen der Kurbelwelle nur während eines Kolbenhinganges eine Kraftwirkung auf den Kolben ausgeübt wird, haben zur Folge, daß sich während der übrigbleibenden  $1\frac{1}{2}$  Umdrehungen der Kurbelwelle der Gang der Maschine verlangsamt. Diesem Übelstande begegnet man durch die Anordnung entsprechend schwerer Schwungräder sowie durch die Vereinigung mehrerer auf eine Kurbelwelle arbeitender Viertaktmaschinen derart, daß deren Arbeitshübe gegeneinander versetzt sind.

Gleichmäßiger gestaltet sich der Gang bei den *Zweitaktmaschinen*, bei denen die vollständige Arbeitsperiode einer Zylinderseite nur eine Kurbelumdrehung, also zwei Kolbenhübe, erfordert. Der Zweitakt kann als ein auf mehrere Zylinder verteilter Viertakt angesehen werden, bei dem das Ansaugen und Vorverdichten (oder auch die volle Verdichtung) von Gas und Luft bzw. des Gemisches in einer getrennten Pumpe, der Ladepumpe, erfolgt. Nach der Zündung findet wie beim Viertaktverfahren eine Expansion statt, worauf kurz vor Erreichung des Totpunktes der Auspuff geöffnet wird. Gleichzeitig wird in den Zylinder unter Überdruck reine Luft (*Spül- oder Fegeluft*) geleitet, welche die Verbrennungsprodukte austreibt. Hinter dieser Luft tritt meist durch dasselbe Ventil das verdichtete Gemisch in den Zylinder; es wird durch den zurückkehrenden Kolben weiter verdichtet und in den Laderaum geschoben, in dem hierauf die Entzündung stattfindet. Diese Maschine ergibt dem Viertakt gegenüber bei doppeltem Gasverbrauch eine 75—95 Proz. höhere Leistung, läuft aber langsam und ist in der Ausführung teurer.

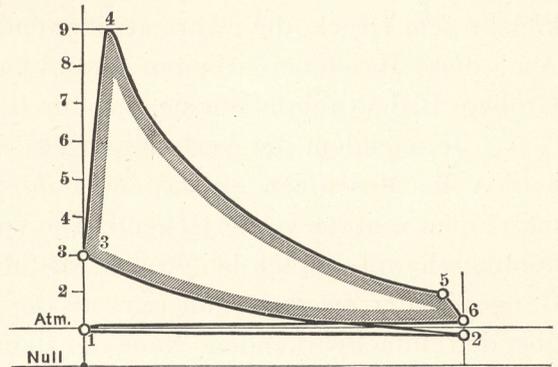


Fig. 194. Diagramm der Viertaktmaschine.

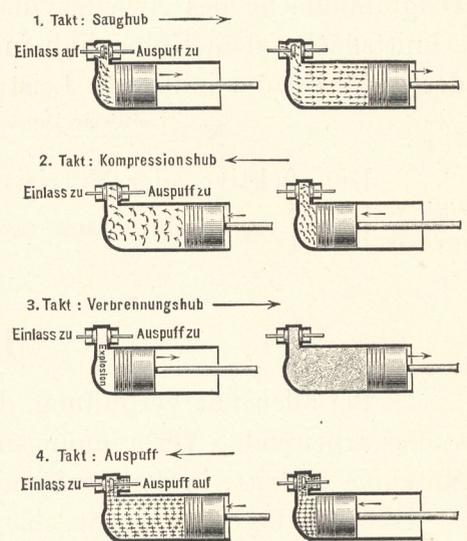


Fig. 195—202. Arbeitsverfahren der Viertaktmaschine.

Weniger gebräuchlich als Vier- und Zweitakt ist der *Sechstakt*. Von dem Viertakt unterscheidet sich dieser nur durch Hinzufügung zweier weiterer Takte, während welcher reine Luft angesaugt und wieder ausgetrieben wird. Zweck der letzten beiden Takte ist eine möglichst vollkommene Austreibung der Verbrennungsprodukte, die jedoch durch einen ungleichmäßigen Gang der Maschinen erkauft wird, weshalb diese Maschinen auch nur selten anzutreffen sind.

Während bei allen vorstehend beschriebenen Arbeitsverfahren die Verbrennung bei konstantem Volumen vor sich geht, ist das Merkmal der *Gleichdruckmaschine* eine Verbrennung bei konstantem Druck, die während einer endlichen meßbaren, wenn auch nur kleinen Zeit stattfindet. Auch diese Maschinen arbeiten sowohl nach dem Viertakt- als auch nach dem Zweitaktverfahren. Größere Bedeutung haben sie erst durch den Dieselmotor erlangt.

Je nachdem die Verbrennungsgase nur auf einer oder beiden Kolbenseiten Arbeit leisten, heißen die Maschinen *einfach-* oder *doppeltwirkend*. Bis jetzt sind einfachwirkende Viertaktmaschinen weitaus vorherrschend. Die Vorteile des Zweitaktes und der doppeltwirkenden Zylinder kommen hauptsächlich bei großen Ausführungen zur Geltung. Bezüglich der Gleichförmigkeit des Ganges ist der Zweitakt günstiger als der Viertakt, ebenso die doppeltwirkenden Maschinen gegenüber den einfachwirkenden. Nach der Bauart sind zu unterscheiden *liegende* und *stehende* Maschinen, sowie mit Rücksicht auf die Anzahl der Arbeitszylinder *Ein-* und *Mehrzylindermaschinen*.

Die Leistung einer Gasmaschine wird in ähnlicher Weise wie bei der Dampfmaschine bestimmt. Ein mittels des Indikators erhaltenes Diagramm gibt Aufschluß über die einzelnen Vorgänge im Arbeitszylinder. Aus diesem läßt sich ein Mittelwert für den Druck, der während einer Arbeitsperiode auf den Kolben ausgeübt wird, feststellen. Bei den Maschinen, die mit besonderen Ladepumpen arbeiten (Zweitaktmaschinen), werden hierbei vorher deren Diagrammflächen von der Diagrammfläche des Arbeitszylinders abgezogen. Aus dem mittleren Druck, der Kolbenquerschnittsfläche, dem Kolbenhub und der Umdrehungszahl berechnet sich unter Berücksichtigung der Taktzahl die indizierte Leistung  $N_i$  der Maschine, und zwar ist

$$N_i = \frac{\text{mittlerer Druck} \times \text{Kolbenquerschnittsfläche} \times \text{Hub} \times \text{Zündungen in der Minute}}{60 \cdot 75}$$

Die effektive oder Nutzleistung kann durch Bremsung ermittelt werden. Das Verhältnis  $\frac{\text{effektive Leistung}}{\text{indizierte Leistung}}$  ergibt dann den mechanischen Wirkungsgrad.

## B. Die Betriebsstoffe.

Bei allen mit Verpuffung, d. h. mit annähernd augenblicklicher Verbrennung, des Betriebsstoffes arbeitenden Verbrennungsmaschinen muß der Betriebsstoff, bevor er in den Zylinder der Maschine eintritt, in den gasförmigen Zustand übergeführt werden. Der eigentliche Kraftträger ist daher ein brennbares Gas, das mit dem Sauerstoff der Luft ein explosives Gemisch bildet. Derartige Gase kommen schon in der Natur gebrauchsfertig als *Erdgas* vor. Das Erdgas findet sich in großen Mengen als Begleiter von Petroleumlagern hauptsächlich im Kaukasus und in den Vereinigten Staaten von Nordamerika. Im Kaukasus wird es schon seit uralter Zeit technisch verwertet, in Amerika wird es außer zu Beleuchtungs- und Heizzwecken besonders im Kraftbetriebe benutzt. In neuerer Zeit sind auch in England und in allerjüngster Zeit auch in Deutschland sehr ergiebige Erdgasquellen erbohrt worden. Das Erdgas besteht zu ungefähr 90 Proz. aus leichten Kohlenwasserstoffen und eignet sich besonders für die Verwendung in Kraftmaschinen; in Amerika baut man Maschinen von 500—1000 PS, die mit Erdgas betrieben werden.

Nächst den Naturgasen kommen für den Betrieb der Gasmaschinen und besonders der Großgasmaschinen die als Nebenprodukte bei Hütten- und Steinkohlenwerken entstehenden Gase in Betracht. Es sind dies die *Hochofengichtgase* und die *Koksofengase*. Die aus der Gichtöffnung der Hochöfen abziehenden Gase enthalten etwa 26—30 Volumprozent Kohlenoxyd, kleinere Mengen von Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen, 7—10 Proz. Kohlensäure und im übrigen hauptsächlich Stickstoff. Diese Gase wurden schon seit langer Zeit außer zur Erhitzung des Hochofenwindes auch