

**Energieeinsparung
und Schadstoffreduzierung
an Beheizungseinrichtungen
in der Industrie**

Henrich / Kozlowski / Liere

H. Henrich/W. Kozlowski/W. Liere Energieeinsparung und Schadstoffreduzierung an Beheizungseinrichtungen in der Industrie

Zusammenfassung Rationeller Energieeinsatz bei möglichst geringem Schadstoffausstoß, das ist der Trend, dem die Entwicklung im Industrieofenbau folgt. Soll das damit gesteckte Ziel erreicht werden, bedarf es des effektiven Zusammenspiels einer komplexen Vielzahl unterschiedlicher Einflußgrößen. Dabei müssen feuerungstechnische Maßnahmen wie Gemisch- und Verbrennungseinstellung, meßtechnische Vorgaben wie Temperaturführung und Brennerregelung sowie ofenbautechnische Lösungen wie die Gestaltung von Brenner, Brennerstein und Ofenraum sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Der folgende Beitrag zeigt, welche Möglichkeiten sich hier bieten.

Energy savings and reduction of pollutant emissions in industrial heating equipment

Summary Rational use of energy with the lowest possible pollutant output: this is the general pattern followed in the development of industrial furnaces. Efficient interaction of a large and complex number of differing influencing factors is necessary if the objective set is to be achieved. Combustion factors such as mixture and combustion adjustment, mensurational targets, such as temperature control and burner regulation, and construction-stage solutions such as the design of burners, burner ports and the furnace chamber must be carefully harmonized with one another. The following article indicates the available potentials.

Economie d'énergie et réduction des matières polluantes sur les dispositifs de chauffage des fours industriels

Résumé L'utilisation rationnelle de l'énergie, entraînant un dégagement aussi faible que possible de matières polluantes, est aujourd'hui un des principaux objectifs du développement chez les constructeurs de fours industriels. Seule l'action combinée d'un nombre complexe de différents paramètres pourra permettre d'atteindre le but recherché. A cet effet, il est nécessaire que soient accordées entre elles toutes les mesures et solutions, tant celles concernant la technique des foyers, telles que le réglage approprié du mélange et de la combustion, que celles touchant la technique de mesure, telles que la conduite de la température et le réglage des brûleurs, ainsi que celles se rapportant à la construction même des fours, telles que la conception des brûleurs, de leur brique et de l'intérieur du four. La présente communication montre les possibilités qui s'offrent pour la réalisation d'un tel objectif.

Schadstoffemissionen und ihre Wirkung

Eines der wesentlichen Qualitätskriterien zur Beurteilung einer Feuerung ist heute die von ihr ausgehende Schadstoffemission. So muß das Ziel einer technischen Verbrennung die verlustarme und möglichst umweltverträgliche Umsetzung chemisch gebundener in thermische Energie sein. Umweltverträglich kann dabei jedoch nur in dem Sinne einer Minimierung des Schadstoffausstoßes verstanden werden, da selbst unter Ausschöpfung der gesamten zur Zeit verfügbaren Technologie die Verbrennung fossiler Energieträger immer mit der Emission einer Reihe umweltrelevanter Stoffe verbunden sein wird.

In Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff, vom Verbrennungsprozeß und natürlich von der Qualität der Verbrennung können folgende Schadstoffe eine feuerungstechnische Anlage in mehr oder weniger hoher Konzentration verlassen:

1. Brennstoffbedingte Emissionen
 - Staub, Halogene, Schwermetalle
 - Kohlendioxid CO_2
 - Schwefeldioxid SO_2
2. Prozeßbedingte Emissionen
 - Kohlenmonoxid CO
 - Kohlenwasserstoffe C_nH_m
 - Ruß
3. Brennstoff- und prozeßbedingte Emissionen
 - Staub, Halogene, Schwermetalle
 - Stickstoffoxide NO_x

Der Gewißheit über den kausalen Zusammenhang zwischen lokal und global festzustellenden Störungen des ökologischen Systems (zum Beispiel Waldsterben, Smog und Treibhauseffekt) und den oben genannten Emissionen haben fortschrittliche Industrienationen mit der Einführung – national teilweise stark differierender – Umweltschutzgesetzgebungen Rechnung getragen.

Wird als Brennstoff Erdgas eingesetzt, so reduzieren sich die Schadstoffprobleme erheblich. Von der gesamten Palette möglicher Schadstoffe bleibt letztlich die Schadstoffgruppe der Stickstoffoxide übrig. Hinzu kommt, daß Erdgas dank seines günstigen C/H-Verhältnisses von allen fossilen Brennstoffen die geringsten spezifischen CO_2 -Emissionen aufweist.

Die Abgase von Feuerungsanlagen haben verschiedenartige Wirkung auf das Leben von Menschen, Tieren und Pflanzen. Damit bestimmte Werte, die eine Gefährdung mit sich bringen, nicht über-

schritten werden, wurden Maximalwerte festgelegt.

Ein solcher Grenzwert ist die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) in part per million (ppm — Teil je Million).

$$1 \text{ ppm} = 1 \text{ cm}^3/\text{m}^3 \\ = \frac{\text{relative Molekülmasse}}{\text{Molvolumen}} \text{ in mg/m}^3$$

Damit bezeichnet man die Luftkonzentration eines Arbeitsraumes — gemessen in Atemhöhe —, die selbst bei achtstündiger Einwirkung die Gesundheit der im Arbeitsraum Beschäftigten nicht schädigt.

Ein weiterer Grenzwert ist der MIK-Wert (Maximale Immissions-Konzentration). Das ist der Wert, der bei maximaler Konzentration luftfremder Stoffe in bodennahen Schichten der Atmosphäre nach den derzeitigen Erfahrungen im allgemeinen für Menschen, Tiere oder Pflanzen bei bestimmter Dauer und Häufigkeit der Einwirkung als unbedenklich gilt.

Verbrennung und Abgas

Die Verbrennung eines Gases ist ein chemisch-physikalischer Vorgang, bei dem die Umwandlung der im Gas gebundenen chemischen Energie unter starker Wärmeentwicklung und Lichterscheinung abläuft.

Unter Verbrennung versteht man die chemische Reaktion der brennbaren Grundstoffe mit Sauerstoff (Oxidation).

Der Verbrennungsvorgang wird eingeleitet durch die Erwärmung des Brennstoffes auf seine Zündtemperatur durch einen Zündfunken oder eine Zündflamme und weiterhin unterhalten durch die freiwerdende Wärme.

Als brennbare Bestandteile von Gasen gelten Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (C_xH_y), Wasserstoff (H_2) und Schwefelwasserstoff (H_2S). Nichtbrennbare Bestandteile sind Kohlendioxid (CO_2), Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2).

Von einer vollkommenen (stöchiometrischen) Verbrennung spricht man, wenn keine brennbaren Teile mehr im Abgas enthalten sind (Luftzahl $\lambda = 1$). Bei der unvollkommenen Verbrennung wird die im Brennstoff enthaltene Wärmeenergie nicht voll ausgenutzt, das Abgas enthält also noch unverbrannte Teile.

Brennstoffbedingte Abgase

Kohlendioxid CO_2 und Wasserdampf H_2O

Die Hauptmenge der Abgase setzt sich aus CO_2 und H_2O zusammen.

Das Einatmen von CO_2 kann, je nach prozentualem Anteil in der Atemluft und entsprechender Einwirkungsdauer, tödlich wirken oder zu Gesundheitsschädigungen führen. Normalerweise ist eine kohlenstoffreiche Atmosphäre arm an Sauerstoff. Hohe Konzentrationen von CO_2 lähmen das Hirnzentrum, kleine bewirken eine Beschleunigung der Atmung.

Der MAK-Wert für Kohlendioxid liegt bei 0,5 Vol.-% (5000 ppm). Bei höherer Konzentration beginnt bereits eine schädigende Wirkung auf den menschlichen Organismus.

Schwefeldioxid SO_2

Da in Brenngasen, insbesondere in Erdgas, nur verschwindend kleine Mengen an Schwefel enthalten sind, kann die Bildung von Schwefeldioxid bei der Verbrennung vernachlässigt werden.

Prozeßbedingt kann es bei einigen Prozessen (zum Beispiel Glasindustrie) zu starker Schwefeldioxid-Bildung kommen, hervorgerufen durch das Einsatzgut. In diesem Falle sind spezielle Sekundärmaßnahmen erforderlich.

Staub, Halogene, Schwermetalle

Da es sich um Feuerungen mit gasförmigen Brennstoffen handelt, tritt bei richtiger Einstellung keine Staubbildung auf. Schwermetalle können nur prozeßbedingt, nicht aber über die Feuerung freigesetzt werden. In diesem Falle sind spezielle Sekundärmaßnahmen erforderlich.

Halogene sind in Verbrennungsgasen nur in vernachlässigbarer Menge vorhanden. Untersuchungen haben jedoch ergeben, daß über die Umgebungsluft Halogene in den Verbrennungsprozeß gelangen können. Verstärkt traten Halogenbelastungen in der Nähe von Reinigungen und auch bei Schwimmbädern (Chlor) auf. Halogene findet man in vielen Reinigungsmitteln, in Baustoffen, Treibmitteln, Bleichmitteln usw.

Prozeßbedingte Abgase

Kohlenmonoxid CO

Für die Luftqualität ist nicht nur die SO_2 -Konzentration maßgebend, sondern gleichermaßen die Belastung der Atmosphäre mit Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden. Hauptverursacher von Kohlenmonoxid ist der Verkehr, bei unsachgemäßer Einstellung auch die Gasfeuerung.

Bei unvollkommener Verbrennung entsteht das hochgiftige Kohlenmonoxid, dessen MAK-Wert bei 0,003 Vol.-% (30

ppm) liegt. Es ist farb- und geruchslos und wird zunächst nicht bemerkt. Es hat eine starke Neigung, sich mit dem roten Blutfarbstoff Hämoglobin zu verbinden. Auch bei kleinster Konzentration führt es zu einer erheblichen Anreicherung im Blut. Nach dem Einatmen blockiert es den lebenswichtigen Sauerstofftransport im Blut und kann zu plötzlicher Bewußtlosigkeit führen. Schon bei einem CO-Gehalt von 0,03 % in der Atemluft sind nach zweistündigem Einatmen 20 % des Hämoglobins durch die Verbindung mit dem CO für die Atmung ausgeschaltet. Steigt der Gehalt auf 60 % CO-Hämoglobin an, so tritt der Tod ein.

Kohlenmonoxid entsteht bei der Verbrennung mit Gasüberschuß ($\lambda < 1$). Speziell in der keramischen Industrie werden im Einsatzmaterial durch das vorhandene CO chemische Prozesse eingeleitet. Zu CO-Bildung kann es ebenfalls kommen, wenn der Brenner falsch eingestellt ist. Hier ist besondere Vorsicht erforderlich, denn es besteht Explosionsgefahr.

Brenner, die anstatt eines Brennerkopfes nur über ein einfaches Mischsystem verfügen, neigen ebenfalls zu CO-Bildung auch bei überstöchiometrischem Betrieb (Luftzahl $\lambda > 1$). Das gilt besonders bei niedriger Betriebstemperatur. CO kann auch entstehen, wenn bei zu hohem Luftüberschuß eine starke Unterkühlung der Flamme eintritt oder wenn die Flamme kalte Anlagenteile berührt.

Kohlenwasserstoffe C_xH_y

Brenner mit unzureichendem Mischsystem neigen aufgrund einer unzulänglichen Vermischung von Gas und Luft dazu, unverbrannte Kohlenwasserstoffe C_xH_y freizusetzen. Das ist besonders bei Prozessen mit niedriger Temperatur ($< 1200^\circ C$) kritisch, da keine Nachverbrennung erfolgt, so daß die Kohlenwasserstoffe nach außen gelangen. Einige Kohlenwasserstoffe sind krebserregend.

Ruß

Ruß ist unverbrannter Kohlenstoff, der sich an kalten Anlagenteilen niederschlägt oder über die Schornsteinanlage nach außen gelangt. Ruß entsteht bei Luftmangel oder auch in zu kalten Flammenbereichen. In den meisten Fällen ist eine falsche Brennereinstellung oder eine zu geringe Mischenergie die Ursache. Ruß gilt als krebserregend.

Brennstoff- und prozeßbedingte Abgase

Stickstoffoxide NO_x

Stickstoff ist ein farb- und geruchloses Gas. Er reagiert sehr träge und verbindet

sich unter normalen Bedingungen mit keinem anderen Element. Er unterhält die Verbrennung nicht. Bei bestimmten Temperaturen verbindet er sich mit Sauerstoff zu den Stickstoffoxiden, die in den Abgasen ebenfalls eine Rolle spielen. Sie entstehen praktisch bei jeder schwefelarmen Verbrennung, in einem solchen Falle ist daher das Augenmerk besonders auf die Emission von Stickstoffoxiden zu richten.

Die Stickstoffoxide gehören neben CO und SO₂ zu den unangenehmsten Luftverunreinigungen. Sie sind stark giftig und machen sich schon in sehr geringen Mengen bemerkbar. Der MAK-Wert von NO₂ liegt bei 5 cm³/m³ (5 ppm ≈ 9 mg/m³), der MIK-Wert bei 0,5 cm³/m³ (≈ 1 mg/m³). NO₂ und NO rufen bei den Pflanzen gleiche Schäden wie SO₂ hervor, wenn die Konzentration das Zwei- bis Vierfache beträgt. Wie das Kohlenmonoxid, sind auch die nitrosen Gase Lungen- und Blutgifte. Bei Sonneneinstrahlung kommt es zu komplizierten chemischen Reaktionen, die zu Reizung der Augen und der Atmungsorgane, bei empfindlichen Menschen zu asthmaphähnlichen Erscheinungen führen.

Die Stickstoffoxide unterscheidet man je nach ihrem Bildungsmechanismus wie folgt:

– Promptes NO_x

Promptes NO_x, auch primäres NO_x genannt, entsteht in der Flammenfront aus Brennstoff und molekularem Stickstoff Kohlenstoff/Stickstoffradikale, die durch molekularen Sauerstoff zu NO_x oxidiert werden. Bei Gasfeuerungen kann dieser Anteil in der Regel vernachlässigt werden.

– Brennstoff-NO

Organisch gebundener Stickstoff im Brenngas oxidiert mit molekularem Sauerstoff zu Stickstoffmonoxid. Auch dieser Anteil kann in der Regel vernachlässigt werden.

– Thermisches NO

Thermisches NO tritt generell bei allen Verbrennungsprozessen auf, bei denen Stickstoff und Sauerstoff zusammengeführt werden. Es entsteht vor allem aus der Reaktion von Luftstickstoff und molekularem Luftsauerstoff. Thermisches NO wird bereits bei Temperaturen > 1200°C in geringer Menge gebildet, wobei als kritische Temperatur für das Entstehen großer Mengen NO_x 1600°C angenommen werden kann.

Die hohen Temperaturen werden im Flammenbereich besonders bei Anlagen mit Luftvorwärmung erreicht. Neben der

Temperatur sind die Verweilzeit der Verbrennungsprodukte im Hochtemperaturbereich sowie der Sauerstoffpartialdruck für die NO_x-Bildung von Bedeutung.

Minderungsmöglichkeiten

Kohlendioxid und Wasserdampf

Bei CO₂ und H₂O besteht eine Möglichkeit zur Minderung des Ausstoßes darin, die Verbrennung zu optimieren.

Durch die Optimierung der Verbrennung im nahstöchiometrischen Bereich, angepaßt an den jeweiligen Prozeß, entsteht zunächst der Eindruck der höchsten CO₂-Bildung. Da aber die Optimierung der Verbrennung automatisch zur Minimierung der Verbrennungsprodukte führt, wird somit die Gesamt-Emissionsmenge reduziert.

Stickstoffoxide

Zur Minderung des NO_x-Ausstoßes bieten sich mehrere Möglichkeiten an:

- richtige Auswahl einer Brennkammer, damit die Temperatur der Verbrennungsprodukte nicht zu hoch wird (< 1600°C),
- Ofenraum ausreichend groß wählen, damit die Flamme unmittelbar nach Eintritt in den Ofenraum Energie durch Rezirkulation an die Ofenatmosphäre abgeben kann,
- Beschleunigung des Energieaustausches zur Ofenatmosphäre durch Rezirkulation,
- Veränderung der Flamme durch geänderte Mischsysteme,
- Wahl der richtigen Brennerregelung,
- Verminderung der Flammentemperatur durch zweistufige Verbrennung

Sonstige Schadstoffe

Auch bei den anderen Schadstoffen

- Staub, Halogene, Schwermetalle
- Kohlenmonoxid
- Kohlenwasserstoffe und
- Ruß

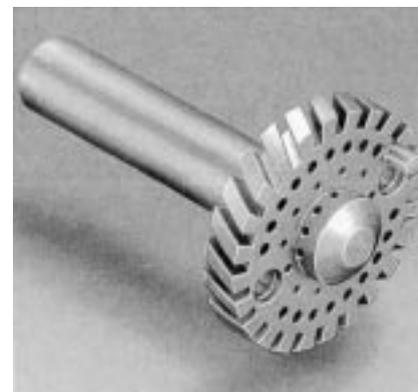
stehen verschiedene ausstoßmindernde Maßnahmen zur Verfügung:

- Das Mischsystem wird optimiert, damit der Brenner auch im nahstöchiometrischen Bereich betrieben werden kann.
- Bei Brennern mit einfachen Mischsystemen kann die Luftzahl angehoben werden. Das führt jedoch zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades

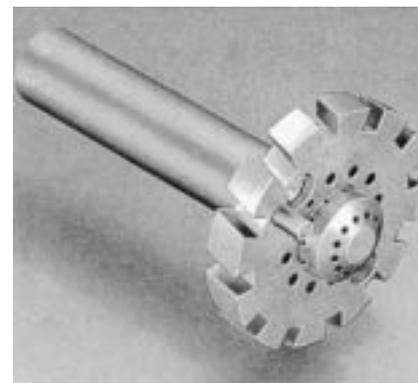
und somit zu einer Erhöhung der Verbrennungsprodukte.

- Falls aus verfahrenstechnischen Gründen eine CO-Atmosphäre gewünscht wird, muß eine thermische Nachverbrennung stattfinden.
- Die Brennkammer ist so zu gestalten, daß eine ausreichende Temperatur (> 1200°C) mit ausreichender Reaktionszeit für die Verbrennungsprodukte verfügbar ist.
- Der Ofenraum ist ausreichend groß zu wählen, damit die Flamme keine kalten Flächen berührt.

Auf die verschiedenen hier aufgeführten Maßnahmen wird im folgenden näher eingegangen.



a)



b)

Bild 1: Brennerkopf mit
a) Kreuzstrom-Mischsystem für Mittelschwindigkeitsbrenner BIC, BIO
b) Parallelstrom-Kreuzstrom-Mischsystem für Mittelschwindigkeitsbrenner BIC, BIO

Fig. 1: Burner tip incorporating:
a) crossflow mixing system for medium-speed BIC burners.
b) parallel-flow/crossflow mixing system for medium-speed BIC, BIO burners

Fig. 1: Tête de brûleur avec
a) un système de mélange à jets croisés pour brûleurs à vitesse moyenne BIC
b) un système de mélange à filets parallèles et à jets croisés pour brûleurs à vitesse moyenne BIC, BIO

Mischprinzip

Brennerköpfe mit Kreuzstrom-Mischprinzip

Für eine vollkommene Verbrennung ist es von Bedeutung, daß Gas und Luft intensiv miteinander vermischt werden. Für diese Anwendungsfälle wurde der mündungsmischende Brennerkopf entwickelt, der im Kreuzstrom-Mischprinzip arbeitet (Bild 1 oben).

Die intensive und direkte Zusammenführung von Gas und Luft ermöglicht einen nahstöchiometrischen Betrieb ($\lambda = 1,02$) auch über einen großen Regelbereich, ohne daß Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff entstehen. Die Brenner können direkt gezündet und überwacht werden.

Brennerköpfe mit Kreuzstrom- und Parallelstrom-Mischprinzip

Da es infolge der intensiven Vermischung speziell beim Betrieb mit Luftvorwärmung zu sehr hohen Temperaturen kommt, können Stickstoffoxid-Verbindungen entstehen. Aus diesem Grunde wurde ein Brennerkopf entwickelt, der teilweise im Kreuzstrom- und teilweise im Parallelstrom-Mischprinzip arbeitet (Bild 1 unten).

Neben den Vorteilen der im Kreuzstrom arbeitenden Brenner wird bei der kombinierten Ausführung ein Teil der Gasmenge nach vorne gebracht. Des Weiteren ist der Drall, den die Luftscheibe erzeugt, geringer, wodurch sich die Flamme verlängert. Aufgrund der größeren Oberfläche der Flamme steht eine größere Fläche für die Wärmeabfuhr an die Ofenatmosphäre zur Verfügung. Die verstärkte Wärmeabfuhr verringert die Temperaturen in der Flamme und damit die NO_x -Bildung.

Im Vergleich zum kreuzstrommischenden Brenner ist die Flamme länger, während alle weiteren Eigenschaften vergleichbar sind.

Brenner mit einfachen Mischsystemen

Bei Brennern mit einfachen Mischsystemen wird das Gas durch eine Bohrung parallel in die Flamme eingedüst (Bild 2). Die Luft gelangt ebenfalls im Parallelstrom zur Verbrennung.

Zur Stabilisierung der Flamme dient der Brennerstein; eine direkte Zündung und Überwachung ist oftmals nicht möglich. Es ist zusätzlicher Installationsaufwand für einen separaten Zündbrenner erforderlich.

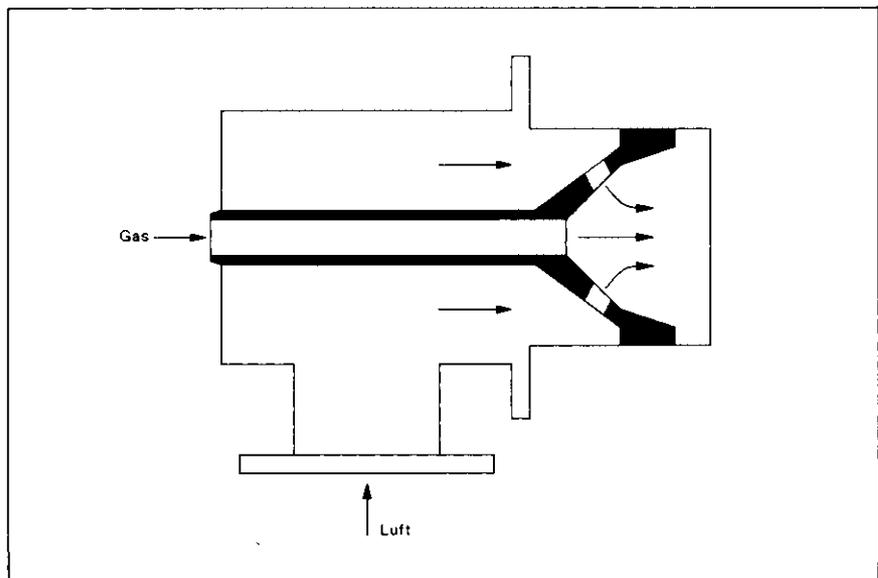


Bild 2: Prinzipskizze eines parallelmischenden Brenners

Fig. 2: Diagram of the principle of a parallel-mixing burner

Fig. 2: Croquis de principe d'un brûleur à mélange parallèle

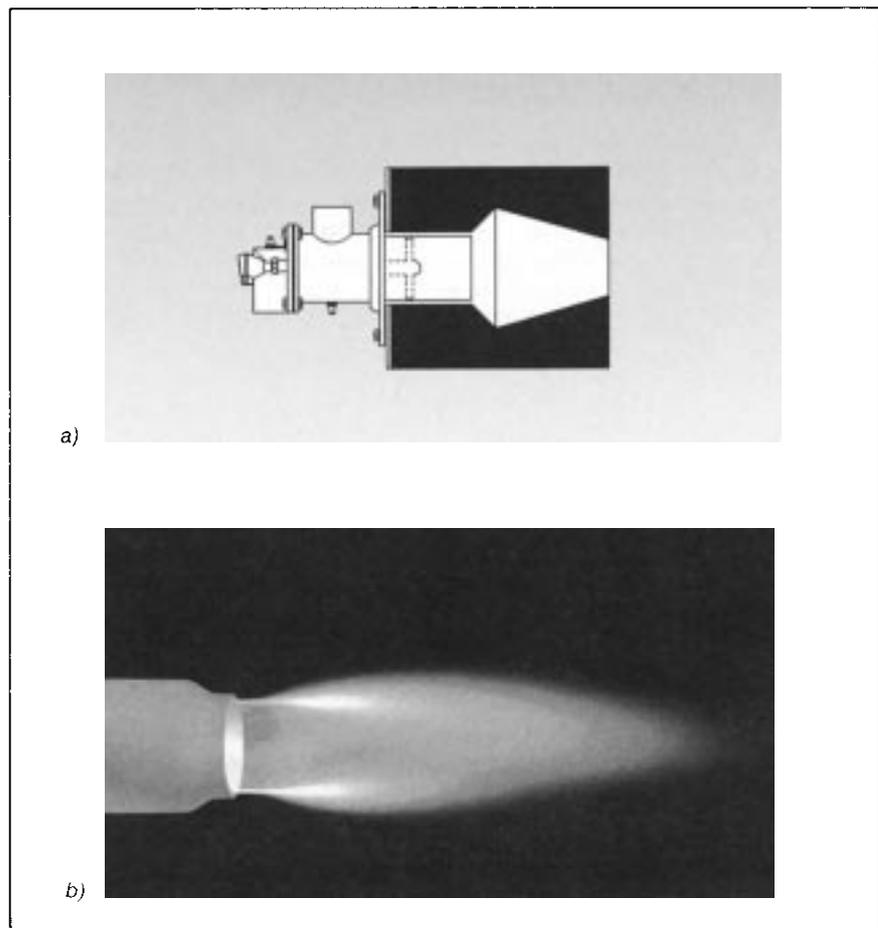


Bild 3: Anordnung Brenner – Brennerstein (a) und Flammenbild (b) eines Mittelgeschwindigkeitsbrenners BIC

Fig. 3: Burner/burner port arrangement (a) and flame pattern (b) of a medium-speed BIC burner

Fig. 3: Disposition du brûleur et de la brique (a) et aspect de la flamme (b) d'un brûleur BIC à vitesse moyenne

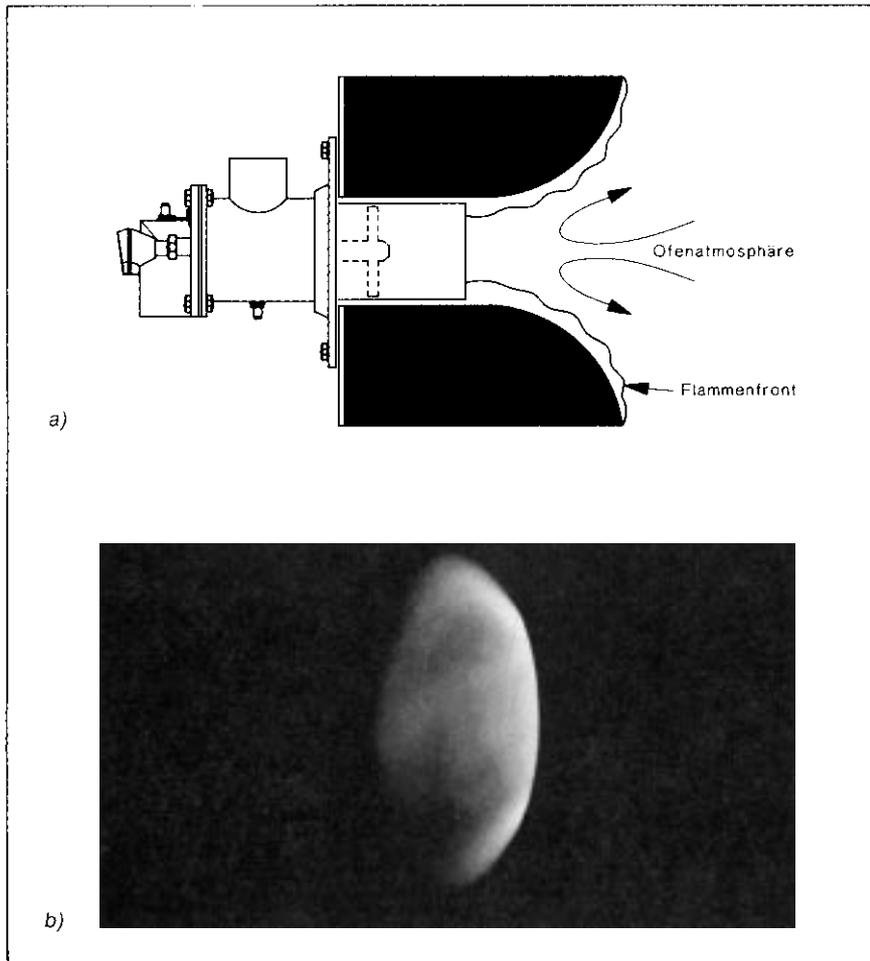


Bild 4: Anordnung Brenner – Brennerstein mit Strömungslinien (a) und Flammenbild (b) eines Flachflammenbrenners BIO...K...

Fig. 4: Burner/burner port arrangement showing flow lines (a) and flame pattern (b) of a BIO...K... flatflame burner

Fig. 4: Disposition du brûleur et de la brique avec lignes d'écoulement (a) et aspect de la flamme (b) d'un brûleur à flamme plate BIO...K...

Im Vergleich zu den oben aufgeführten Brennern gibt es teilweise Einschränkungen im Regel- und Luftzahl-Bereich.

Brenner mit Parallelstrom-Mischeinrichtung können zur CO-Bildung neigen, speziell bei niedriger Anschlußleistung und niedriger Ofentemperatur. Aufgrund des weichen Mischprinzipes bilden sich in der Flamme keine Temperaturspitzen aus. Dies hat zur Folge, daß nur geringe Mengen NO_x gebildet werden.

Brennkammer

Gemeinsam mit dem Brennerkopf beeinflusst die Brennkammer folgende verbrennungstechnische Größen:

- Flammenform,
- Flammengröße,
- Flammentemperatur,

- Lautstärke,
- Strömungsgeschwindigkeit,
- Ausbrand,
- Thermische Belastung des Brennerkopfes,
- Brennerstabilität,
- Anschlußdrücke des Brenners,
- Abgaswerte.

Die Bilder 3 und 4 lassen erkennen, wie über die Ausführung von Brenner und Brennerstein die Flammenform zu beeinflussen ist.

Bei der Auswahl einer Brennkammer sind folgende Punkte zu beachten:

- Brennergröße,
- Anschlußleistung,
- Austrittsgeschwindigkeit,
- Ofenraum,
- Emissionswerte,
- Ofenraumtemperaturer, i,
- Luftvorwärmtemperaturen.

Einfluß der Brennkammer auf die Emissionswerte:

Bildung von Kohlenmonoxid

CO entsteht im Temperaturbereich unter 1200°C . Wenn aufgrund einer zu kleinen Brennkammer ein Ausbrand des Gas-Luft-Gemisches nicht möglich ist, kann es speziell bei Anlagen mit niedriger Ofentemperatur zur CO-Bildung kommen. Das wird besonders verstärkt, wenn die Flamme kalte Ofenraumteile berührt und somit die Verbrennung unterbrochen wird.

Bildung von Stickstoffoxiden

NO_x entsteht verstärkt im Temperaturbereich über 1600°C . Wenn aufgrund einer zu großen Brennkammer die Verweilzeit des Gas-Luft-Gemisches sehr groß wird, nähert sich die praktische Flammentemperatur stark der theoretischen.

Bei Anlagen mit hoher Ofenraumtemperatur ($> 1200^\circ\text{C}$) und hoher Luftvorwärmtemperatur ($> 350^\circ\text{C}$) können in der Flamme Temperaturen von 1600°C und mehr erreicht werden.

Strömungsgeschwindigkeit

Neben den Temperaturen in der Brennkammer selbst ist Energieabgabe an die Ofenraumatmosfera von entscheidender Bedeutung auf die NO_x -Bildung. Bei hoher Strömungsgeschwindigkeit wird Ofenraumatmosfera in den Bereich der Flamme gesaugt. Hierdurch kommt es zu einer schnellen Energieabgabe von der Flamme an die Ofenraumatmosfera. Das wiederum führt zu einer Reduzierung der Flammentemperatur unter die kritische Grenze von 1600°C .

Abgasrückführung

Bei der Abgasrückführung wird durch Zwangsführung Ofenraumatmosfera in die Verbrennungsluft gebracht. Das Ofenabgas senkt den Sauerstoffanteil in der Verbrennungsluft, so daß die Verbrennungsluftmenge angehoben werden muß. Die erhöhte Luftmenge führt zu einer Abkühlung der Flamme und somit zu einer Reduzierung der NO_x -Bildung.

Als sinnvoll erwiesen hat sich eine Abgasrückführung

- bei Anlagen, bei denen eine extrem niedrige NO_x -Emission gefordert ist,
- bei Anlagen mit niedriger Betriebstemperatur, da hier die Rückführung einfacher ist,
- bei Anlagen mit wenigen Brennern, aber großer Anschlußleistung.

Da jedoch eine Abgasrückführung konstruktiv sehr aufwendig ist, sollte man erst darauf zurückgreifen, wenn einfachere Emissions-Minderungsmaßnahmen, zum Beispiel Rezirkulation durch Flamme, ausgeschöpft wurden.

Rezirkulation durch Flammenführung

Durch die Rezirkulation mit Hilfe der Flamme wird im Wesentlichen die NO_x -Bildung reduziert. Im Vergleich zu anderen Maßnahmen hat sich die Rezirkulation als einfachste und billigste Lösung zur Reduzierung des NO_x -Ausstoßes erwiesen.

Rezirkulation durch Mittel- oder Hochgeschwindigkeitsbrenner

Als Hochgeschwindigkeitsbrenner bezeichnet man Brenner, bei denen die Austrittsgeschwindigkeit mehr als 100 m/s beträgt. Als Mittelgeschwindigkeitsbrenner (siehe Bilder 1a und 3a) gelten Brenner, bei denen die Austrittsgeschwindigkeit bei Nennleistung zwischen 70 und 100 m/s liegt. Dieser Wert wird über die zugeführten Volumenströme und über eine angenommene Flammentemperatur errechnet.

Messungen haben gezeigt, daß durch Einsatz von Mittelgeschwindigkeitsbrennern die NO_x -Emissionswerte um 50% reduziert werden konnten, im Vergleich zu einer Installation mit Brennersteinen in konisch öffnender Ausführung. Da Hochgeschwindigkeitsbrenner im Regel- und Luftzahl-Bereich sowie in der Flammenstabilität eingeschränkt sind, scheint die Ausführung als Mittelgeschwindigkeitsbrenner die beste Alternative darzustellen.

Rezirkulation durch Flachflammenbrenner

Flachflammenbrenner bilden durch den Brennerstein (siehe Bilder 1b und 4a) eine große Flammenoberfläche, die in der Lage ist, eine große Energiemenge schnell abzugeben. Hierdurch können die Flammentemperaturen auch bei hohem Luftvorwärm- und Ofentemperaturen gering gehalten werden.

Die im trompetenförmigen Brennerstein anliegende Flamme verursacht in der Brennersteinmitte einen Unterdruck (siehe Bild 4b). Der Unterdruck wird durch einströmende Ofenatmosphäre ausgeglichen, die wiederum über die Flamme nach außen getragen wird. Die Ofenatmosphäre sorgt zusätzlich für eine Kühlung der Flamme.

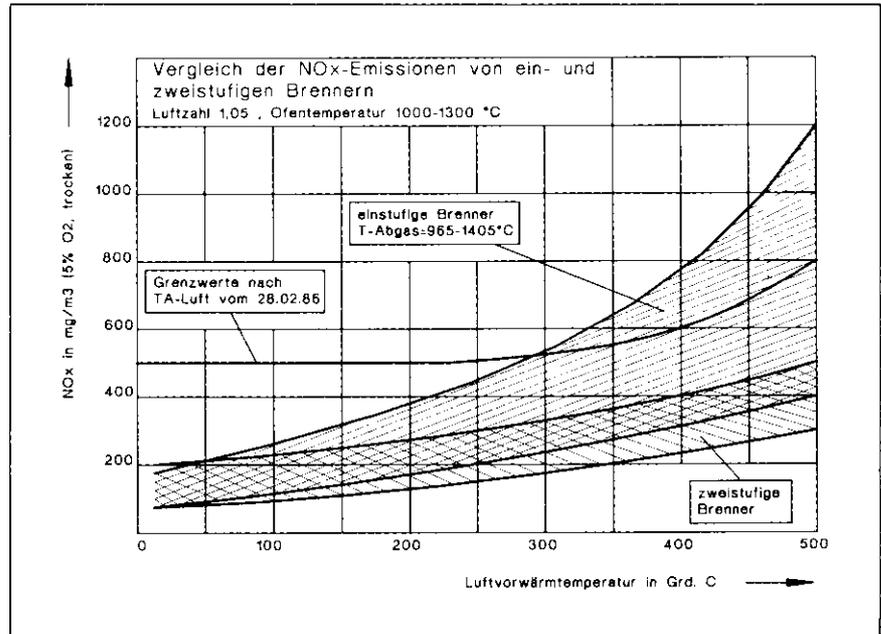


Bild 5: NO_x -Emissionswerte von ein- und zweistufigen Brennern

Fig. 5: NO_x emission figures for single and two-stage burners

Fig. 5: Chiffres d'émission de NO_x de brûleurs monoétagés et bitagés

Zweistufige Verbrennung

Durch die zweistufige Verbrennung wird im Wesentlichen die NO_x -Bildung reduziert (Bild 5). Bei Anlagen mit Luftvorwärmtemperaturen über 350°C erscheint der Einsatz sinnvoll.

– Bei der zweistufigen Verbrennung wird in der ersten Stufe (Bild 6) eine unterstöchiometrische Verbrennung durchgeführt. Da diese Verbrennung aufgrund des zu großen Gasangebotes

nur unvollständig ist, entsteht in der Flamme eine wesentlich geringere Temperatur, im Vergleich zur einstufigen Verbrennung (Bild 7). In der zweiten Stufe wird die für die vollständige Verbrennung erforderliche Luftmenge der Flamme zugeführt.

– Praktische Messungen haben gezeigt, daß ein λ -Wert von 0,7 in der ersten Stufe sinnvoll erscheint. Da die Verbrennungsluft in der Regel über einen Luftanschluß zugeführt wird, müssen der

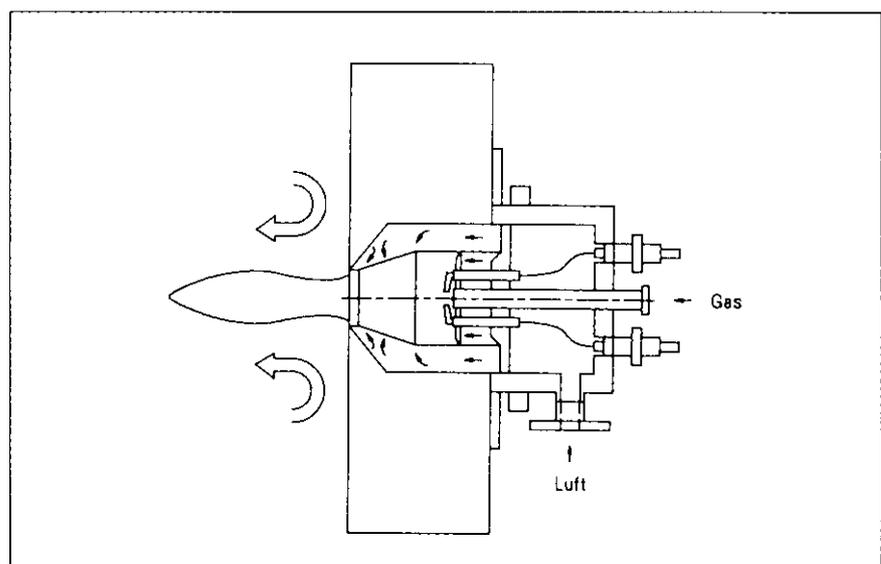


Bild 6: Aufbau eines zweistufigen Brenners

Fig. 6: Structure of a two-stage burner

Fig. 6: Conception d'un brûleur biétagé

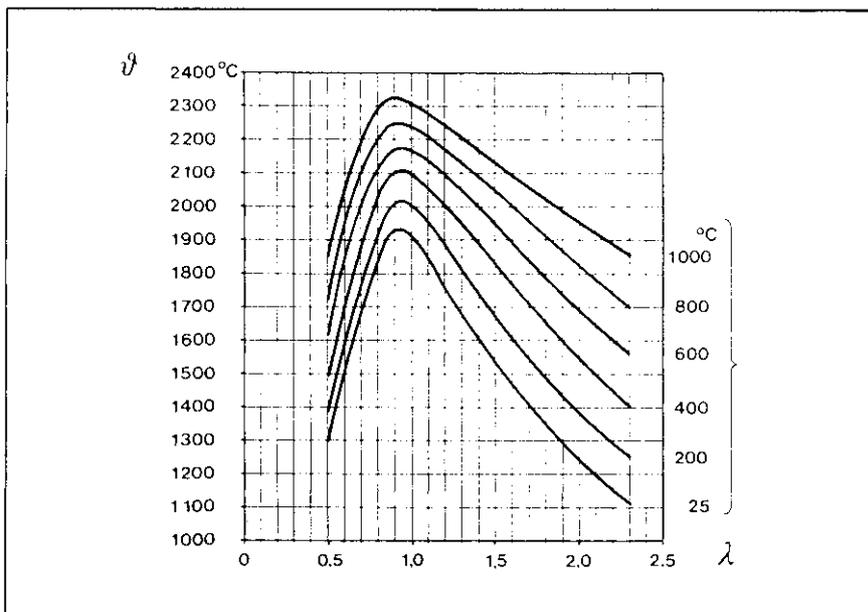


Bild 7: Einfluß der Luftzahl und der Luftvorwärmtemperatur auf die Flammentemperatur

Fig. 7: Influence of air index and air preheat temperature on flame temperature

Fig. 7: Influence de l'indice d'air et de la température de préchauffage de l'air sur la température de la flamme

Leistungs- und Luftzahlbereich genau bekannt sein. Während des Betriebes sind größere Änderungen der Luftzahl nur bedingt möglich, da hierüber die Luftmenge in der Primärstufe geändert wird und damit auch die Flammentemperatur.

— Brenner mit separat zugeführter Sekundärluft ermöglichen einen größeren Luftzahlbereich und können auch bei extrem hoher Luftzahl eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich um Sonderkonstruktionen, die individuell an die

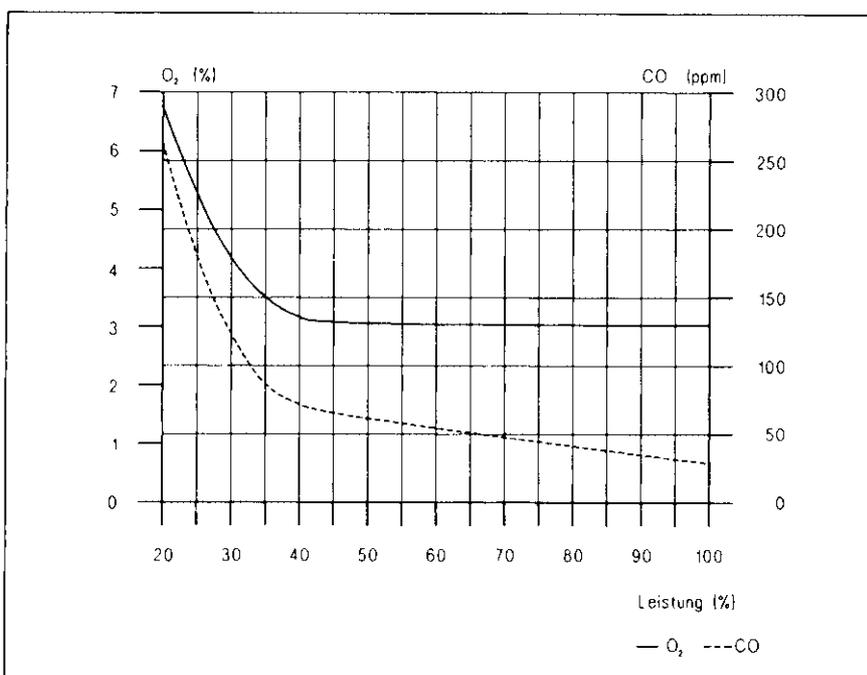


Bild 8: Änderung des CO- und des O₂-Ausstoßes in Abhängigkeit von der Brennerleistung

Fig. 8: Changes in CO and O₂ emission as a function of burner output

Fig. 8: Variation du dégagement de CO et de O₂ en fonction de la puissance du brûleur

anlagenspezifischen Gegebenheiten angepaßt werden müssen.

Brennerregelung

Außer dem Brenner selbst übt auch die Brennerregelung einen wesentlichen Einfluß aus auf die Emission von

- Kohlenmonoxid und
- NO_x bei vorgewärmter Verbrennungsluft

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid entsteht bei unvollkommener Vermischung von Gas und Luft.

Brenner mit einfachen Mischsystemen

Brenner mit einfachen Mischsystemen werden mit stufiger Regelung betrieben, wobei die Verbrennungsluft kalt oder vorgewärmt zugeführt wird.

Eine modulierende Regelung führt speziell bei Brennern dieser Bauart im unteren Leistungsbereich zur CO-Bildung (Bild 8). Es empfiehlt sich daher, solche Brenner in zweistufiger Fahrweise zu betreiben, wobei der Brenner zwischen Groß und Aus getaktet wird.

Brenner mit Kreuzstrom- und Parallel-Kreuzstrom-Mischköpfen

Brenner dieser Ausführung werden mit kalter oder vorgewärmter Verbrennungsluft bei stufiger oder modulierender Regelung betrieben. Auch bei diesen Brennern findet man einen geringen Anstieg der CO-Werte bei niedriger Anschlußleistung. Die CO-Emissionswerte fallen in der Regel jedoch so gering aus, daß diese Brenner über einen großen Regelbereich modulierend gefahren werden können.

Ein zweistufiger Betrieb ist ebenfalls möglich, wobei die Brenner in Groß-Klein- oder auch Groß-Klein-Aus-Fahrweise betrieben werden können. Die Klein- oder Grundlast beträgt etwa 10 % der angegebenen Vollast des Brenners. Um eine CO-Bildung auszuschließen, wird in der Grundlast Luftüberschuß eingestellt.

Bei noch größeren Regelbereichen können Brenner mit separat zugeführter Grundlast eingesetzt werden, wobei Regelbereiche von 1:20 bis 1:60 im nahstöchiometrischen Bereich erreicht werden können.

NO_x bei vorgewärmter Verbrennungsluft

NO_x entsteht verstärkt im Temperaturbereich über 1600 °C. Aus diesem Grund ist bei Betrachtung der Regelung als

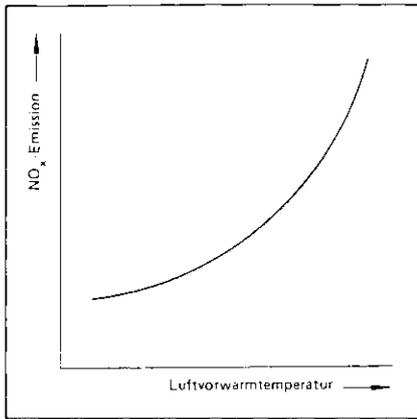


Bild 9: Einfluß der Luftvorwärmung auf die NO_x -Bildung

Fig. 9: Influence of air preheat on formation of NO_x

Fig. 9: Influence du préchauffage de l'air sur la formation de NO_x

wesentliches Entscheidungsmerkmal die Verbrennungslufttemperatur zu beachten (Bild 9).

Kaltluft

Kaltluftbetrieb ist mit allen Brennarten bei stufiger oder modulierender Regelung möglich. Temperaturen von mehr als 1600°C werden bei dieser Betriebsart normalerweise nicht erreicht. Deshalb tritt nur eine relativ geringe NO_x -Bildung auf, die über die Regelung nur unwesentlich zu beeinflussen ist (Bild 10 a).

Vorgewärmte Verbrennungsluft

Beim Betrieb mit vorgewärmter Verbrennungsluft werden speziell bei Brennern mit Kreuzstromsystem hohe Temperatu-

ren in der Flamme erreicht. Das wird zusätzlich verstärkt, wenn der Brenner modulierend geregelt wird, da aufgrund der kleineren Volumenströme von Gas und Luft ein vollständiger Ausbrand in der Brennkammer eintritt (Bild 10 b). Aus den oben genannten Gründen empfiehlt es sich, die Brenner im Groß-Klein-Betrieb zu regeln. In der Kleinlast sollte der Brenner entweder mit einem geringen Gasüberschuß (Gefahr der CO-Bildung) oder mit einem Luftüberschuß betrieben werden (Bild 11). Sollte keine der Einstellungen aus verfahrenstechnischen Gründen möglich sein, empfiehlt sich eine Groß-Klein-Aus-Regelung, wobei der Brenner mit einer Zündlast (Klein- oder Grundlast) gezündet wird. Wenn auch diese Art der Regelung nicht möglich ist, kann man den Brenner während des Grundlast-Betriebes über einen zusätzlichen Luftanschluß mit kalter Verbrennungsluft versorgen, um hierdurch die Flammentemperatur zu senken.

Kalte oder vorgewärmte Verbrennungsluft

Einfache und kombinierte Mischsysteme erreichen aufgrund der Gas- und Luftzuführung nicht so hohe Flammentemperaturen. Hierdurch kommt es im Vergleich zu Kreuzstrom-Mischköpfen zu einer geringeren NO_x -Bildung (Bild 12). Die Brenner können modulierend und stufig geregelt werden, soweit es die Mischsysteme zulassen.

Gestaltung des Ofenraumes

Neben dem Brenner mit Brennkammer hat der Ofenraum Einfluß auf folgende Emissionen:

- Kohlenmonoxid,
- NO_x bei vorgewärmter Verbrennungsluft

Anlagen mit niedriger Ofentemperatur

Hier besteht die Gefahr der Kohlenmonoxidbildung. Bei Anlagen mit niedriger Betriebstemperatur muß daher der Ofenraum mindestens so groß sein, daß die Flamme keine kalten Teile des Ofens berühren kann. Wenn ein Ofen beschickt wird, darf das Einsatzgut den freien Ausbrand der Flamme nicht beeinflussen.

Anlagen mit hoher Betriebstemperatur

In diesen Anlagen besteht die Gefahr der NO_x -Bildung. An Anlagen mit hoher Betriebstemperatur müssen darum die Flammen die Möglichkeit haben, schnell Energie an die Ofenraumatmosfera abzugeben.

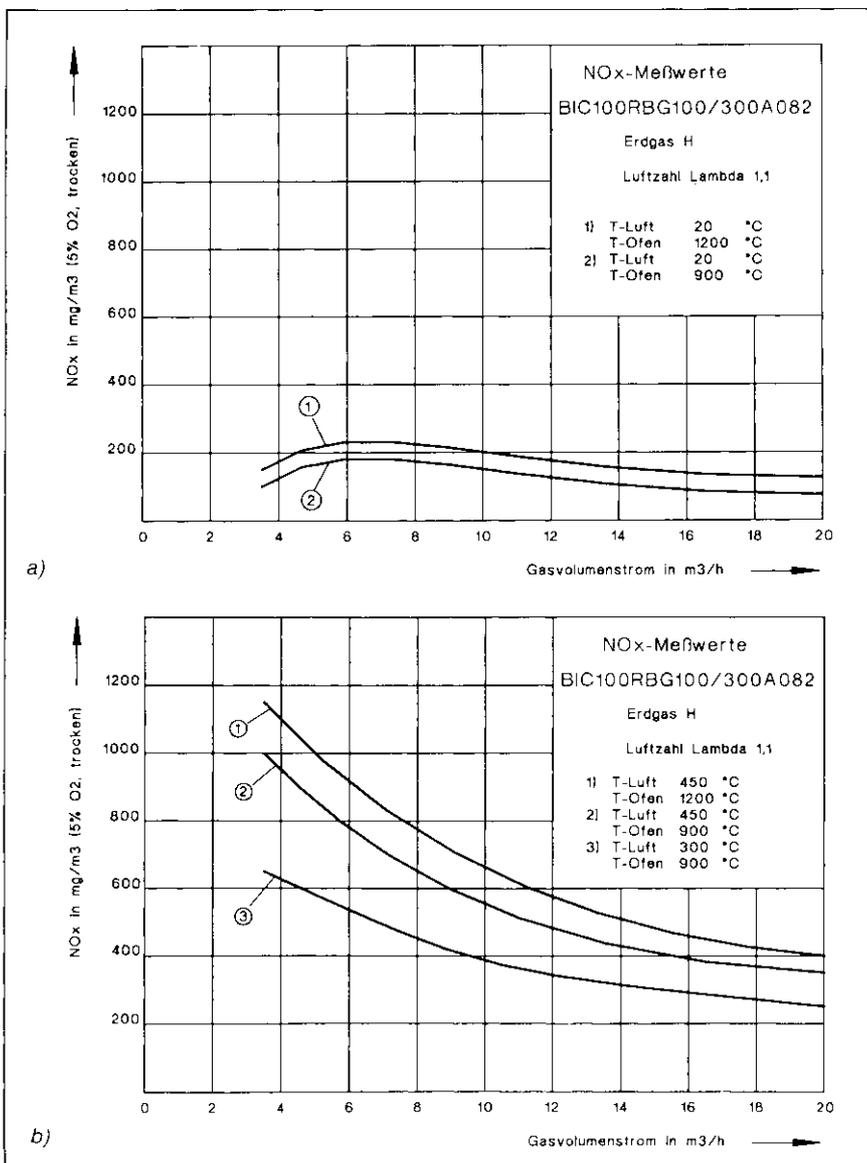


Bild 10: Einfluß der Leistung auf die NO_x -Emissionswerte eines Mittelschwindigkeitsbrenners bei Kaltluftbetrieb (a) und bei Warmluftbetrieb (b)

Fig. 10: Influence of output on NO_x emission figures from a medium-speed burner operated with cold air (a) and preheated air (b)

Fig. 10: Influence de la puissance sur les valeurs d'émission de NO_x d'un brûleur à vitesse moyenne dans le cas d'une marche à froid (a) et d'une marche à air chaud (b)

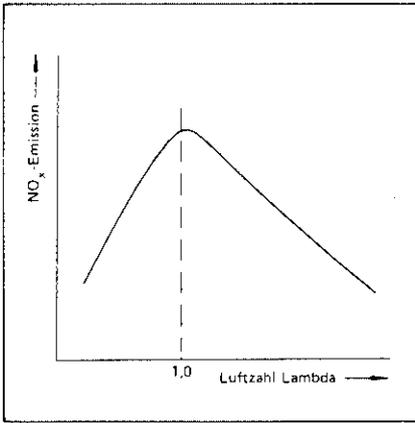


Bild 11: Einfluß der Luftzahl auf die NO_x-Emissionswerte

Fig. 11: Influence of air index on NO_x emission figures

Fig. 11: Influence de l'indice d'air sur les valeurs d'émission de NO_x

Eine schnelle Energieabfuhr ist nur dann möglich, wenn ein großes Volumen der Ofenatmosphäre mit der Flamme in Verbindung gebracht werden kann. Aus diesem Grunde muß im Bereich der Flamme genügend Raum vorhanden sein, damit Ofenatmosphäre durch die Flamme angesaugt werden kann (Bild 13, siehe auch Bild 4 a). Eine genaue Angabe der Größe des Raumes, der für Zirkulation zur Verfügung stehen sollte, ist pauschal nicht möglich.

Thermische Nachverbrennung und andere Sekundärmaßnahmen

Bei thermischen Nachverbrennungsanlagen handelt es sich um Anlagen, die dem Prozeß nachgeschaltet sind und

deren Aufgabe ausschließlich darin besteht, durch den Prozeß entstandene Schadstoffe zu beseitigen bzw. zu verringern.

Bei verschiedenen Prozessen erfordert das Einsatzgut spezielle Atmosphären, deren Abgase hoch belastet sind. Hierbei handelt es sich im allgemeinen um Abgase, die nicht durch den Verbrennungsprozeß, sondern durch das Einsatzgut selbst entstehen. Beispiele sind:

- Ofenanlagen in der Keramikindustrie,
- Glasöfen,
- Anlagen, in denen Bindemittel eingesetzt werden, usw.

Absorptions- bzw. Naßverfahren
 Absorptions- bzw. Naßverfahren finden verstärkt als Entschwefelungsanlagen Anwendung.

Für die Abgasreinigung hinter Prozessen, die mit Gas beheizt werden, sind diese Verfahren in der Regel ungeeignet, da nur ein geringer Anteil an Schwefel vorhanden ist.

Trockenverfahren

Selektives Verfahren

Hier wird bei einer Abgastemperatur von etwa 800°C Ammoniak (NH₃) in den Abgasstrom eingedüst, wo es mit dem NO_x reagiert. Die dabei ablaufenden Hauptreaktionen sind in Tafel 1 zusammengestellt.

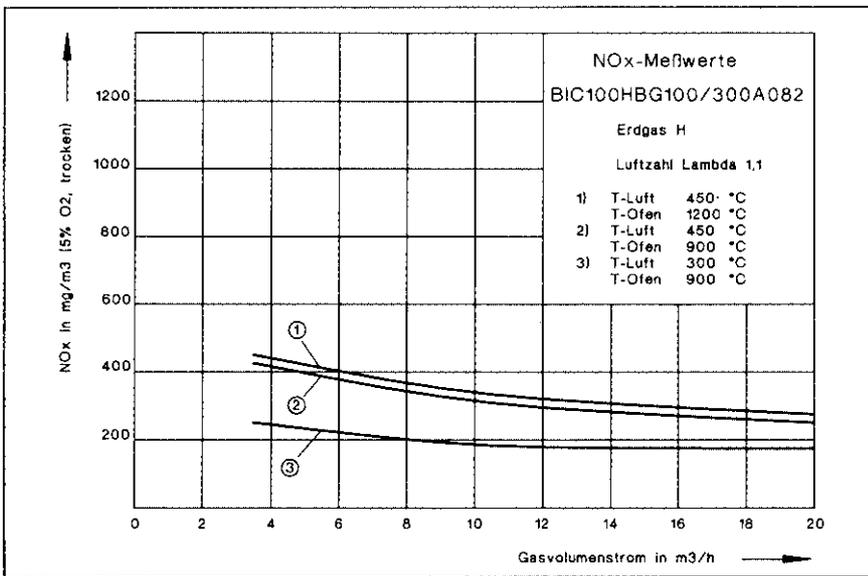


Bild 12: Einfluß der Leistung auf die NO_x-Emissionswerte eines Mittelgeschwindigkeitsbrenners bei Warmluftbetrieb; Mischsystem einfach oder kombiniert

Fig. 12: Influence of output on NO_x emission figures from a medium-speed burner operated on preheated air; single or combined mixing system

Fig. 12: Influence de la puissance sur les valeurs d'émission de NO_x d'un brûleur à vitesse moyenne dans le cas d'une marche à air froid; système de mélange simple ou combiné

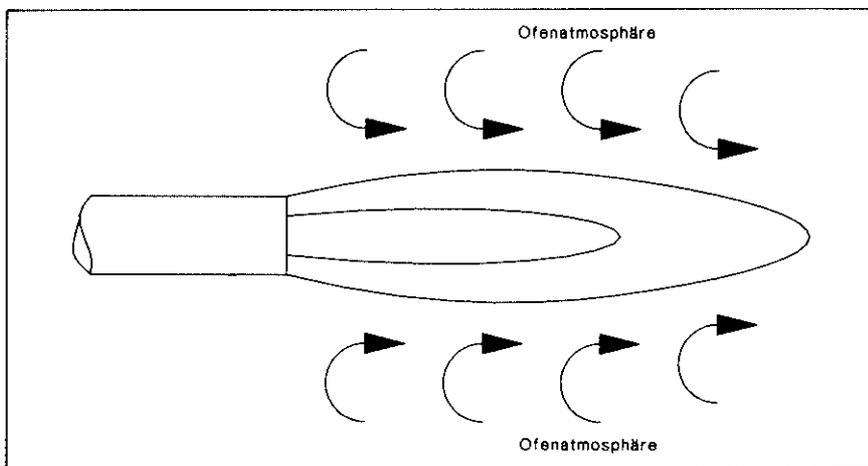


Bild 13: Flammenkühlung durch Zirkulation am Mittelgeschwindigkeitsbrenner

Fig. 13: Flame-cooling via circulation on a medium-speed burner

Fig. 13: Refroidissement de la flamme par circulation sur le brûleur à vitesse moyenne

Tafel 1: Hauptreaktionen beim Eindüsen von Ammoniak

Table 1: Principal reactions occurring at injection of ammonia

Tableau 1: Principales réactions lors de l'injection d'ammoniac

Stickstoffmonoxid (NO)	
$4 \text{ NH}_3 + 6 \text{ NO}$	$\rightarrow 5 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$
$4 \text{ NH}_3 + 4 \text{ NO} + \text{O}_2$	$\rightarrow 4 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$
Stickstoffdioxid (NO ₂)	
$8 \text{ NH}_3 + 6 \text{ NO}_2$	$\rightarrow 7 \text{ N}_2 + 12 \text{ H}_2\text{O}$
$4 \text{ NH}_3 + 2 \text{ NO}_2 + \text{O}_2$	$\rightarrow 3 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$

Katalytisches Verfahren

Auch bei diesem Verfahren wird NH₃ zugesetzt. Im Gegensatz zum selektiven Verfahren läuft jedoch die Reaktion zwischen den Stickstoffoxiden und dem Ammoniak bei einer Temperatur zwischen 300 und 500 °C ab.

Vergleich der Sekundärmaßnahmen

Zusammengefaßt kann gesagt werden, daß ein zusätzlicher Sekundäraufwand erhebliche Investitionen und Betriebskosten verursacht. Der bei den Katalysatoren zunächst scheinbar vorhandene Vorteil der niedrigen Betriebstemperatur wird kompensiert, wenn man dem die Empfindlichkeit gegen Verschmutzung und Zerstörung gegenüberstellt. Beim Einsatz von Ammoniak sind die Kosten für das Reaktionsmittel zu nennen, dazu treten unkontrollierte Reaktionen auf. Die thermische Nachverbrennung stellt beim derzeitigen Stand der Technik wohl die vernünftigste Alternative dar.

Energieeinsparung

Brennstoffbedingte Schadstoffemissionen wie Kohlenmonoxid und Stickstoffoxide stehen in direktem Zusammenhang zum Brennstoffverbrauch. Eine drastische Senkung der Schadstoffemissionen ist somit am einfachsten durch Senkung des Energieverbrauches möglich. Verbesserungen werden erreicht durch verfeinerte Abläufe im Produktionsprozeß, verbesserte Ofenkonstruktion mit neuartigen Isoliermaterialien, angepaßte und optimierte Regelungs- und Brennertechnik durch die Auswahl der Brennstoffart [1]. In vielen Fällen läßt sich der Energieverbrauch — und auch die Schadstoffemission — durch eine einzige Maßnahme senken, wie im folgenden Beispiel an einer Impulsfeuerung dargestellt wird.

Impulsfeuerung

Bei Wärmebehandlungsöfen (zum Beispiel Herdwagenöfen, Rollenherdöfen, Haubenöfen) durchläuft das Wärmegut verschiedene Temperaturstufen, so beispielsweise beim Anlassen 200 bis 700°C, beim Glühen 700 bis 1100°C und beim Härten 800 bis 1200°C. Dabei werden in engen Grenzen liegende Endtemperaturen bei völlig gleichmäßiger Durchwärmung des Wärmegutes und sehr geringer Temperaturdifferenzen (± 5 K) verlangt. Außerdem müssen häufig auch Aufheiz- und Abkühlkurven genau eingehalten werden, um eng tolerierte Werkstoffeigenschaften (Gefüge, Festigkeit, Zähigkeit usw.) zu erreichen. Ähnliche Anforderungen sind auch bei Tunnel- oder Rollenherdöfen in der Keramikindustrie zu erfüllen. Bei ihnen bestimmt die Temperaturgleichmäßigkeit in den Heizzonen die Produktqualität und den Ofendurchsatz.

Grundsätzlich erreicht man einen Temperaturengleich über den Ofenraum

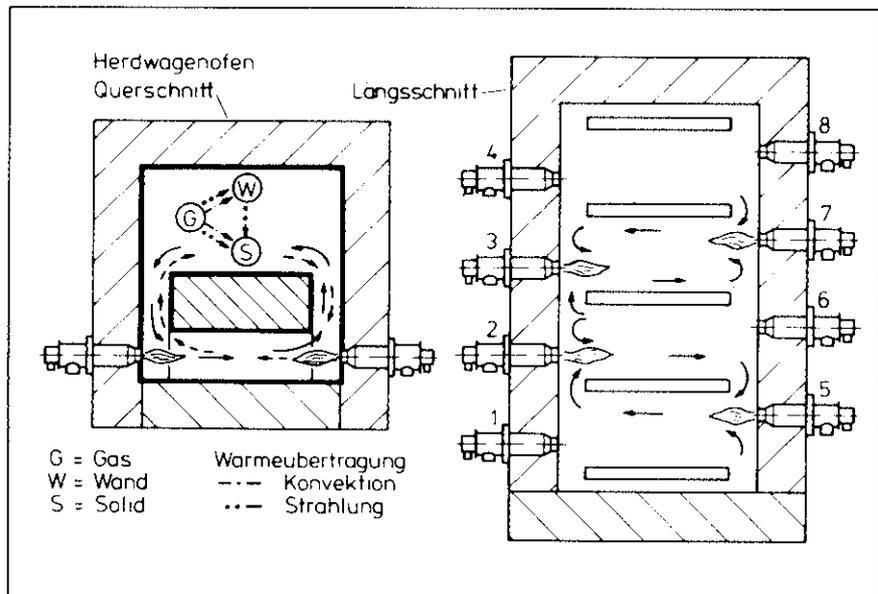


Bild 14: Brenneranordnung in einem Wärmebehandlungssofen

Fig. 14: Burner arrangement in a heat-treatment furnace

Fig. 14: Disposition du brûleur dans un four de traitement thermique

durch Umwälzen der Ofenatmosphäre. Anstelle der früher verwendeten Umwälzventilatoren werden heute Hochgeschwindigkeitsbrenner eingesetzt, deren Abgasstrahl einen Teil der Gasmasse des Ofens ansaugt und so eine intensive Vermischung bewirkt.

Entscheidend ist der Austrittsimpuls, das heißt das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit der heißen Gase. Bei kontinuierlicher Regelung der Brenner halbiert sich bei Reduzierung der Leistung auf 50 % sowohl der Volumenstrom als auch die Geschwindigkeit um diesen Betrag, so daß der Impuls auf ein Viertel des

Impulses bei Vollast zurückgeht. Schaltet man dagegen, um die gleiche Leistung zu erreichen, die Brenner 50 % der Zeit aus, läßt sie jedoch die anderen 50 % auf Vollast brennen, so geht der Impuls im Mittel ebenfalls nur auf 50 % zurück, das heißt, er ist doppelt so hoch wie bei der kontinuierlichen Regelung.

Im unteren Leistungsbereich wird der Unterschied noch größer. Aus diesem Grunde ist insbesondere im Teillastbereich die Impulsfeuerung für die Temperaturengleichmäßigkeit im Ofen erheblich wirksamer als die kontinuierliche Regelung.

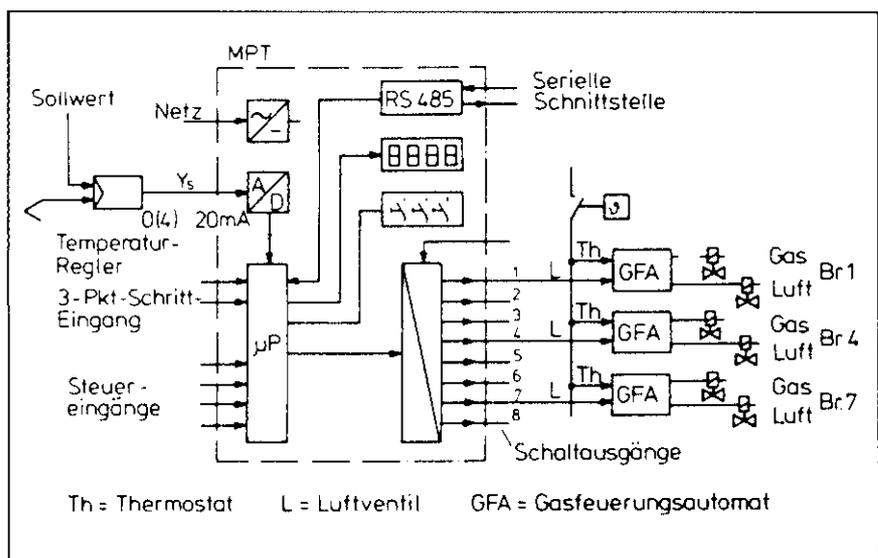


Bild 15: Regeleinrichtung einer Impulsfeuerung

Fig. 15: Control system for a pulse-combustion system

Fig. 15: Dispositif de réglage d'un foyer à impulsion

Die erforderliche Heizleistung eines Ofens wird auf eine größere Anzahl von Brennern aufgeteilt, die so eingebaut sind, daß ihre Abgasstrahlen nicht direkt das Wärmgut oder die Chargenträger berühren. Gegenüberliegende Brenner sind gemäß Bild 14 entweder seitlich versetzt angeordnet oder elektrisch so geschaltet, daß ein gleichzeitiger Betrieb ausgeschlossen ist.

Um Temperaturunterschiede bei unterschiedlich großen Werkstücken zu vermeiden werden die Brenner in Zonen zusammengefaßt, die mit dem zugehörigen Thermoelement einen Regelkreis bilden. Das Ausgangssignal eines stetigen Temperaturreglers wird in einem Taktsteuergerät MPT in eine Sequenz von Impulsen aus Brenndauer und Pausenzeiten gewandelt (siehe Bilder 15 und 16a). Die Leistungsverstellung geschieht durch Ändern des Verhältnisses von Brenndauer und Pausenzeit. Es sind verschiedene Betriebsarten möglich (Bild 16b), zum Beispiel

- Heizen oder Heizen/Kühlen,
- feste oder variable Impulsbreite.

Als Parameter können die Brenndauer, die Mindesteinschaltdauer und die Mindestausschaltdauer für das Heizen oder auch für das Kühlen eingegeben werden. Beim Kühlen werden nur die den Brennern zugeordneten Luftventile betätigt.

Das lineare Verhalten zwischen dem Stellsignal des Temperaturreglers und der Brennerleistung bewirkt ein günstiges Regelverhalten. Die Reihenfolge der Ansteuerung der Brenner hängt von der gewünschten Strömung im Ofen ab; sie kann zum Beispiel bei den Brennern in Bild 14, 1, 5, 2, 6 oder 1, 2, 5, 6 lauten.

Bei der Impulsfeuerung mit Groß-Klein-Betrieb brennen die Brenner während der Pausen auf Kleinlast, die etwa 5 % der Maximalleistung beträgt. Dadurch ist eine Zündung bei jedem Impuls nicht erforderlich, so daß keine erhöhte Beanspruchung für die Gasfeuerungsautomaten auftritt. Bei der Umschaltung auf Vollast sorgt die pneumatische Gemischregelung mit Gleichdruckreglern für einen störungsfreien Betrieb. Ist in der Haltephase bzw. der Ausgleichszeit ei-

nes Wärmebehandlungsprozesses die Brennerleistung bei Kleinlast noch zu hoch, so werden beim Groß-Klein-Aus-Betrieb einzelne Brenner zeitweise abgeschaltet. Im Taktsteuergerät wird die Brenndauer dieser Brenner über mehrere Zyklen so lange addiert, bis die Mindestbrenndauer erreicht ist, die eine Sekunde größer als die Sicherheitszeit des Gasfeuerungsautomaten ist. Der Brenner wird wieder bei Kleinlast gezündet und kurzzeitig auf Vollast gefahren, wodurch ein hoher Abgasimpuls für eine erneute Umwälzung der Ofenatmosphäre entsteht.

Bei der Impulsfeuerung wird der Brenner nur in beiden Laststufen „Vollast“ und „Kleinlast“ bzw. „Ein“ und „Aus“ betrieben. Im Vergleich zu Brennern mit stetiger Leistungsverstellung ist hier das Verhältnis $P_{max}:P_{min}$ größer und kann Werte 20:1 bis 40:1 erreichen, weil der Gasstrom bei Kleinlast durch entsprechende Bypass-Düsen im Gleichdruckregler GIB und der Luftstrom durch Bohrungen im Luftventil bzw. durch den Schlupf der Luftklappen festgelegt und genau aufeinander abgestimmt sind. Je nach Brennerkonstruktion ist bei Kleinlast eine Luftzahl von 1,4 bis 1,8 für eine optimale Verbrennung erforderlich. Beim Grundlastbrenner wird das Gas für die Kleinlast getrennt dem Brennerkopf zugeführt und nahstöchiometrisch verbrannt. Auf diese Weise läßt sich eine gleichbleibende Ofenatmosphäre bei allen Betriebsbedingungen einhalten.

Die Impulsfeuerung mit Hochgeschwindigkeitsbrennern hat Vorteile bezüglich der NO_x -Emission gegenüber modulierend betriebenen Brennern mit stetiger Leistungsverstellung, weil der Hochgeschwindigkeitsbrenner immer in seinem optimalen Arbeitspunkt mit dem dann niedrigsten NO_x -Wert betrieben wird. In diesem Fall sind also zwei Ziele mit ein und derselben Maßnahme erreichbar: gute Umwälzung der Ofenatmosphäre und niedrige NO_x -Werte der Verbrennung.

Die Taktsteuerung wird deshalb zunehmend auch bei anderen Brennersystemen eingesetzt, bei denen eine gleichmäßige Temperaturverteilung von großer Bedeutung für den Prozeß ist, zum Beispiel bei Strahlrohren für indirekte Ofenbeheizung oder bei Decken- und Flachflammenbrennern.

Schrifttum

- [1] Kozłowski, W.: Sicherheit, Energieeinsparung und aktiver Umweltschutz an Industrieöfen. Gaswärme Internat. 40 (1991) Nr. 3, S. 119–127
- [2] G. Kromschöder AG: KST-Buch 2

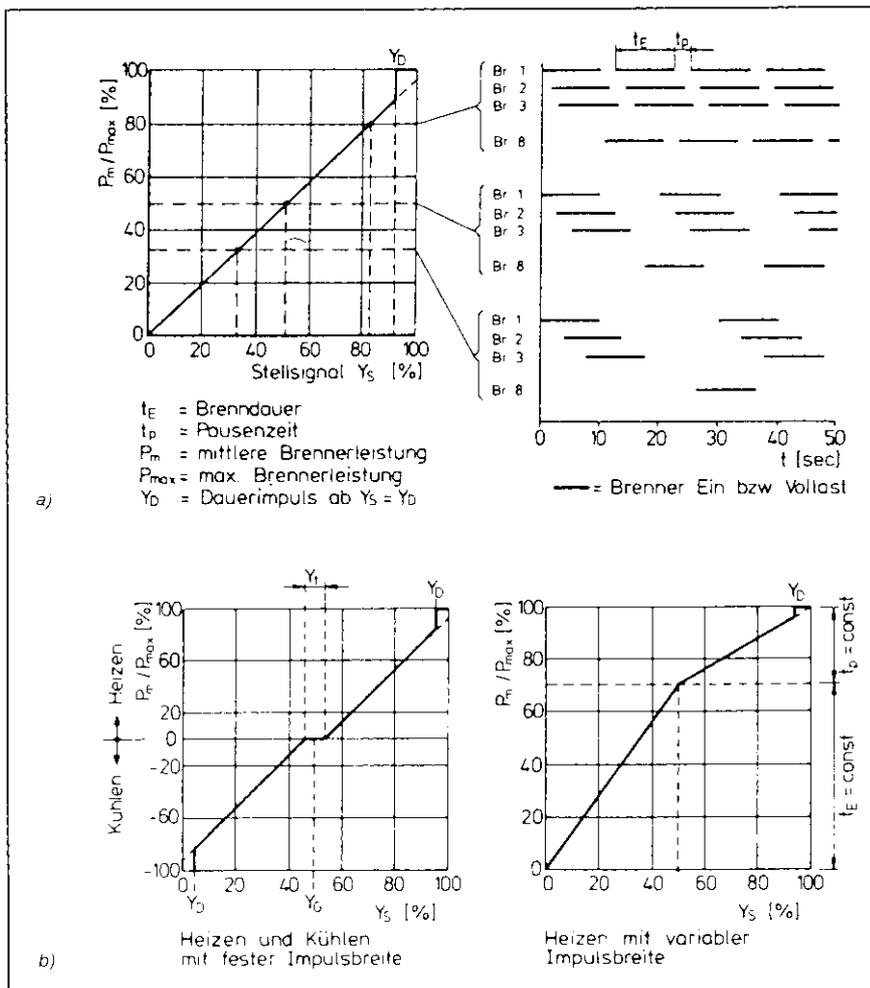


Bild 16: Regeldiagramme für unterschiedliche Ofenbetriebsarten

Fig. 16: Control diagrams for various modes of furnace operation

Fig. 16: Diagramme de réglage pour différents modes de fonctionnement du four