

# 5

# Grundlegendes zur Feststoff-Verbrennung

## 5.1 Begriffsdefinitionen

Zum Verständnis der Terminologie und der Zusammenhänge ist es erforderlich, nachfolgend zunächst die wichtigsten Begriffe zu erläutern, bevor die eigentlichen Vorgänge der Verbrennung und die Besonderheiten von Anlagen für biogene Festbrennstoffe dargestellt werden. Auf die Definition des Heizwerts, Brennwertes, Wasser- und Feuchtegehalts kann hier verzichtet werden, da diese Begriffe bereits in Kapitel 4 (Brennstoffeigenschaften) ausführlich erläutert wurden.

**Flüchtige Bestandteile.** Unter flüchtigen Bestandteilen werden Zersetzungsprodukte der organischen Substanz verstanden. Sie entweichen, wenn biogene Festbrennstoffe erhitzt werden. Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen – zumeist brennbare Gase – wird unter definierten Bedingungen (ca. 1 g Probe, 7 min Luftabschluss, Temperatur von 900 °C) ermittelt und erlaubt Aussagen über die Zündfreudigkeit in einer Feuerungsanlage /5-1/. Umgekehrt proportional zu dem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen ist der Anteil des Kohlenstoffs (Holzkohle), der nach der Erhitzung zurückbleibt.

Der Anteil der flüchtigen Bestandteile am gesamten Brennstoff liegt bei Lignocellulosebrennstoffen meist bei 74 bis 83 % der TM. Holzbrennstoffe markieren mit durchschnittlich 82 % das obere Ende dieser Bandbreite; Getreidestroh und Wiesenheu liegen mit 76 bzw. 74 % dagegen im unteren Bereich. Im Vergleich dazu weisen Kohlen-Brennstoffe mit 6 bis 45 % (verschiedene Steinkohlen) bzw. 45 bis 63 % (Hart- bzw. Weichbraunkohlen) deutlich niedrigere Werte auf /5-2/.

Durch den hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen eignen sich biogene Festbrennstoffe auch für die Vergasung, d. h. für die Erzeugung eines gasförmigen Brennstoffs für die spätere energetische Nutzung.

**Verbrennungswasser und Taupunkt.** Das bei der Oxidation eines wasserstoffhaltigen Brennstoffs chemisch gebildete Wasser wird als Verbrennungswasser bezeichnet. Zudem wird bei feuchten Brennstoffen Wasser mit dem Brennstoff eingetragen, das in der Feuerung verdampft und als Wasserdampf mit dem Abgas ausgetragen wird.

Der aus diesen beiden Quellen resultierende Wassergehalt im Abgas bestimmt den Taupunkt der Abgase. Beispielsweise beträgt der Taupunkt bei einem Luftüberschuss von 1,5 für trockenes Holz 45 °C und für nasses Holz 62 °C /5-8/. Bei Unterschreitung des Taupunktes fällt Kondensat an, welches in den meisten Fällen unerwünscht ist, da es zu Korrosion im Kamin und ggf. in weiteren Anlagenteilen führen kann und außerdem entsorgt werden muss. In den meisten Anwendungsfällen darf deshalb eine bestimmte Abgastemperatur – abhängig von Brennstoff, Wassergehalt und Luftüberschuss – nicht unterschritten werden.

Außer bei Feuerungen mit Wärmerückgewinnung durch Abgaskondensation stellt die Verdampfungswärme des Wassers einen Energieverlust dar, der besonders bei nassen Brennstoffen die Gesamtenergiebilanz erheblich verschlechtert. Da aber der Feuerungswirkungsgrad meist auf den Heizwert und nicht auf den Brennwert (vgl. Kapitel 4) bezogen wird, spiegelt sich der Unterschied zwischen trockenen und nassen Brennstoffen im Wirkungsgrad kaum wider.

**Luftüberschusszahl (Luftüberschuss).** Um eine vollständige Oxidation der im Brennstoff enthaltenen oxidierbaren Verbindungen sicherzustellen, wird dem Verbrennungsprozess in der Regel Verbrennungsluft im Überschuss zugeführt. D. h. der Reaktion wird mehr Sauerstoff zur Verfügung gestellt, als zur vollständigen Oxidation aller im Brennstoff befindlichen Komponenten notwendig wäre. Der Grad des Luftüberschusses wird mit der Luftüberschusszahl

Lambda ( $\lambda$ ) beschrieben. Sie ist nach Gleichung (5-1) definiert als das Verhältnis zwischen der innerhalb eines bestimmten Zeitraumes einem Oxidationsvorgang insgesamt zugeführten Luftmenge  $m_{\text{Luft,ges}}$  zu der für die vollständige Oxidation minimal benötigten Luftmenge  $m_{\text{Luft,min}}$ .

$$\lambda = \frac{m_{\text{Luft,ges}}}{m_{\text{Luft,min}}} \quad (5-1)$$

Für eine vollständige Oxidation muss somit die Luftüberschusszahl mindestens eins betragen (ohne Luftüberschuss). Tatsächlich liegt sie beispielsweise bei Holzfeuerungen zwischen 1,5 und 2,5; d. h. die Verbrennung erfolgt bei Luftüberschuss /5-5/.

Es gibt aber auch thermochemische Prozesse, bei denen die Luftüberschusszahl deutlich kleiner als eins, aber größer als null ist. Bei Festbrennstoffen spricht man dann von Vergasung. Ist die Luftüberschusszahl gleich null (d. h. es wird kein Sauerstoff von außen zugeführt), spricht man von einer pyrolytischen Zersetzung des eingesetzten Festbrennstoffs. Dabei erfolgt dessen Aufspaltung in gasförmige, flüssige und feste Sekundärenergieträger unter Einwirkung von Wärmeenergie.

**Verbrennung.** Kohlenstoff (C) oder Wasserstoff (H) werden in Gegenwart von Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) unter Energiefreisetzung zu Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) oder Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) oxidiert. Dieser Vorgang beschreibt die Verbrennung von Biomasse, die im Wesentlichen aus Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) besteht und mit der chemischen Summenformel  $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_p$  bezeichnet werden kann. Kommt es zu einer vollständigen Oxidation sämtlicher oxidierbarer Bestandteile des Brennstoffs, spricht man von vollständiger Verbrennung. Die Luftüberschusszahl muss dabei immer gleich oder größer als eins sein. Bei Luftmangel, das heißt bei Luftüberschusszahlen unter eins, verbleiben nach Ablauf der Oxidationsreaktionen noch un- oder teiloxidierte Brennstoffmengen (z. B. Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_n\text{H}_m$ )), die anschließend unter Energieabgabe weiter oxidiert werden können. Dann handelt es sich um eine unvollständige Verbrennung /5-5/.

**Vergasung.** Wird ein Brennstoff wie beispielsweise Kohlenstoff (C) unter Sauerstoffzugabe nicht zu Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), sondern zu Kohlenstoffmonoxid (CO) oxidiert und damit teilverbrannt (d. h. die Luftüberschusszahl ist kleiner als eins und größer als null), spricht man von Vergasung oder auch von Teilverbrennung /5-4/. Das entstandene Gas – im genann-

ten Beispiel CO – kann anschließend (ggf.) in einem anderen technischen Prozess an einem anderen Ort unter Energieabgabe weiter oxidiert werden. Mit Hilfe der Vergasung können also feste Brennstoffe in ein Brenngas und damit in einen gasförmigen Sekundärenergieträger umgewandelt werden, der dann – zumindest theoretisch – mit bestimmten energietechnischen Verfahren z. B. zur Stromerzeugung effizienter nutzbar ist.

Neben dem eigentlichen thermochemischen Prozess der Vergasung (d. h. die Umwandlung eines Festbrennstoffs durch Teiloxidation in ein Brenngas) wird unter Vergasung oft auch die anlagentechnische Umsetzung (z. B. als Vergasungsanlage) verstanden.

**Pyrolyse.** Auch bei der Pyrolyse handelt es sich um einen thermochemischen Prozess. Er findet jedoch im Unterschied zur Verbrennung oder Vergasung ausschließlich unter der Einwirkung von Wärme und unter Sauerstoffabschluss statt (d. h. die Luftüberschusszahl ist null). Da Biobrennstoffe Sauerstoff enthalten (bei Holz z. B. ca. 44 %  $\text{O}_2$ ; vgl. Kapitel 4), kann es sich bei den Zersetzungsreaktionen trotzdem um Oxidationsreaktionen handeln /5-4/.

Außer für den beschriebenen thermochemischen Prozess der pyrolytischen Zersetzung von organischer Substanz unter Wärmeeinwirkung wird der Begriff der Pyrolyse auch für die Herstellung von Flüssigenergieträgern aus fester Biomasse in entsprechenden technischen Anlagen (z. B. Pyrolyseanlage) verwendet.

**Feuerungstechnischer Wirkungsgrad.** Der feuerungstechnische Wirkungsgrad  $\eta_f$  berücksichtigt die Abgasverluste der Feuerung in Form von thermischen und chemischen Verlusten. Wichtige Bestimmungsgrößen sind die Abgastemperatur, der Luftüberschuss ( $\text{O}_2$ - oder  $\text{CO}_2$ -Gehalt) sowie der Gehalt an Kohlenstoffmonoxid (CO) und ggf. weiteren unverbrannten Abgaskomponenten. Die Verluste durch Strahlung und Konvektion der Feuerung sowie Stillstandsverluste werden im feuerungstechnischen Wirkungsgrad dagegen nicht berücksichtigt.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad  $\eta_f$  berechnet sich nach Gleichung (5-2). Unter Berücksichtigung der relativen thermischen Verluste ( $V_{\text{therm}}$ ) durch fühlbare Wärme der Abgase und der relativen chemischen Verluste ( $V_{\text{chem}}$ ) durch unvollständige Verbrennung. Die thermischen und chemischen Verluste werden auf die Energiemenge des mit dem Heizwert bewerteten Brennstoffs bezogen.

$$\eta_f = 1 - V_{\text{therm}} - V_{\text{chem}} \quad (5-2)$$



**Kesselwirkungsgrad.** Beim Kesselwirkungsgrad  $\eta_k$  wird die mit einem Wärmeträgermedium (z. B. Wasser) abgeführte Wärmeenergie in Beziehung zur zugeführten Brennstoffenergie (d. h. Heizwert mal Brennstoffmasse) gesetzt. Hier werden neben den Abgasverlusten, die in den feuerungstechnischen Wirkungsgrad einfließen, zusätzlich auch die Strahlungs- und Rostverluste berücksichtigt. Strahlungsverluste entstehen durch Wärmeabgabe der heißen Feuerung an den Heizraum und Rostverluste durch unverbrannte Rückstände in der Asche. Der Kesselwirkungsgrad liegt meist um einige Prozentpunkte niedriger als der feuerungstechnische Wirkungsgrad; bei guter Wärmedämmung der Feuerung und des Kessels und bei einem guten Ascheausbrand kann er diesem jedoch sehr nahe kommen.

**Nutzungsgrad.** Auch beim Nutzungsgrad  $\eta_n$  wird die abgeführte Wärmeenergie in Beziehung zur zugeführten Brennstoffenergie gesetzt. Jedoch handelt es sich hierbei zum einen um einen sehr langen Betrachtungszeitraum mit wechselnden Einsatzbedingungen (z. B. Heizperiode, Kalenderjahr) und zum anderen um eine Betrachtung des gesamten Systems (z. B. eines Heizsystems). Das heißt, neben den Betriebsverlusten werden auch die Bereitschaftsverluste der Konversionsanlage (Auskühlung und Gluterhaltung) sowie die Verluste eines ggf. vorhandenen Speichers und der Wärmeverteilung berücksichtigt.

Der Nutzungsgrad ist eine der wesentlichen Kenngrößen, mit denen die „Güte“ einer energietechnischen Anlage beschrieben wird. Dabei kann zwischen dem Nutzungsgrad des Kessels und dem Nutzungsgrad der Anlage unterschieden werden. Ersterer umfasst den mittleren Kesselwirkungsgrad bei Volllast bzw. Teillast und die Anfahr-, Abfahr- sowie Bereitschaftsverluste. Der Anlagennutzungsgrad kann darüber hinaus Speicher-, Verteilungs- und sonstige Verluste enthalten.

## 5.2 Ablauf der Verbrennung

Die Verbrennung von pflanzlicher Biomasse umfasst eine Reihe verschiedener physikalischer und chemischer Prozesse, von der Trocknung über die Vergasung durch partielle Luftzufuhr bis hin zur anschließenden Oxidation von brennbaren Gasen und festem Kohlenstoff. In Bereichen des Feuerraumes ohne Luftzufuhr können lokal auch Prozesse der Pyrolyse anstelle der Vergasungsprozesse auftreten. Zusammenfassend kann der Vorgang in einer Festbettver-

brennung im Wesentlichen durch folgende Teilprozesse beschrieben werden, wobei sich die Betrachtungen zur Vereinfachung nur auf die Hauptbrennstoffbestandteile C, H und O beziehen /5-7/:

- *Erwärmung* des Brennstoffs durch Rückstrahlung von Flamme, Glutbett und Feuerraumwänden,
- *Trocknung* des Brennstoffs durch Verdampfung und Abtransport des Wassers bei Temperaturen ab ca. 100 °C,
- *Pyrolytische Zersetzung* des wasserfreien Brennstoffs durch Temperatureinwirkung bei Temperaturen ab ca. 150 °C,
- *Vergasung des wasserfreien Brennstoffs* mit Sauerstoff zu brennbaren Gasen (Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe) und festem Kohlenstoff (ab ca. 250 °C),
- *Vergasung des festen Kohlenstoffs* mit Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Sauerstoff zu Kohlenstoffmonoxid (ab ca. 500 °C),
- *Oxidation der brennbaren Gase* mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser bei Temperaturen ab ca. 700 °C bis ca. 1.400 °C (real) bzw. bis ca. 2.000 °C (theoretisch),
- *Wärmeabgabe der Flamme* an die umgebenden Feuerraumwände und den neu zugeführten Brennstoff.

In der ersten Phase wird der aufgegebenen Brennstoff zunächst erwärmt. Das erfolgt durch Rückstrahlung von der Flamme, dem Glutbett und den Feuerraumwänden aber auch durch Konvektion und Wärmeleitung im Brennstoff. Die Verdampfung des anhaftenden oder eingeschlossenen Wassers beginnt danach hauptsächlich bei Temperaturen oberhalb von 100 °C. Dabei schreitet die Trocknungsf front von außen nach innen fort, wobei die Trocknungsgeschwindigkeit von der Wärmeleitfähigkeit abhängt. Diese wiederum wird von der Rohdichte und – bei Holz – von der Faserrichtung beeinflusst.

Während das Brennstoffteilchen innen noch trocknet, beginnt außen bereits die pyrolytische Zersetzung der Holzbestandteile (vgl. Kapitel 5.1), die durch Einwirkung höherer Temperaturen ausgelöst wird. Dabei kommt es zu einer Aufspaltung der langkettigen organischen Verbindungen, aus denen sich lignocellulosehaltige Biomassen zusammensetzen (u. a. Cellulose), in kürzerkettige Verbindungen, wobei brennbare Gase in Form von Kohlenstoffmonoxid (CO) und gasförmigen Kohlenwasserstoffen ( $C_nH_m$ ) sowie Pyrolyse-Öle (Teere) gebildet werden.

Dieser Vorgang benötigt keinen Sauerstoff. Da Sauerstoff aber – auch unter Luftabschluss – in chemisch gespeicherter Form (bei Holz ca. 44 % i.d.TM, vgl. Kapitel 4) oder durch Luftzuführung stets vor-

handen ist, kommt es unmittelbar nach der Aufspaltung zu mehr oder weniger vollständigen Oxidationsreaktionen unter Wärmefreisetzung.

Um den Prozess der Entgasung durch diese Wärmefreisetzung nicht nur in Gang zu halten sondern möglichst auch in der Leistung zu steuern, wird in Feuerungsanlagen gezielt an den Ort der pyrolytischen Zersetzung (z. B. Glutbett) Luftsauerstoff als sogenannte „Primärluft“ zugeführt. Bei diesem als Vergasung bezeichneten Teilprozess wird die benötigte Wärme aus unvollständigen Reaktionen der gasförmigen Pyrolyseprodukte mit Sauerstoff bereitgestellt. Um auch die festen und flüssigen Pyrolyseprodukte (Kohle, Teere) angreifen zu können, sind im Vergleich zur pyrolytischen Zersetzung mit zum Teil über 500 °C merklich höhere Temperaturen notwendig.

Im Teilprozess der Oxidation haben sich die Brenngase bereits teilweise im Feuerraum ausgebreitet, was sich am Flammenverlauf ablesen lässt. Unter Einwirkung von zum Teil gezielt zugeführtem Luftsauerstoff („Sekundärluft“) findet hier eine mehr oder weniger vollständige Oxidation der freigesetzten gasförmigen Produkte CO und C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> statt, wobei unter Bildung von Zwischenprodukten (z. B. Wasserstoff) Kohlenstoffdioxid und Wasser entstehen. Der Abbau der Kohlenwasserstoffe erfolgt dabei über die Bildung von CO als Zwischenprodukt, das in einer weitergehenden Oxidation zu CO<sub>2</sub> reagiert. Die Verbrennung ist in dieser Phase selbst-katalysiert und exotherm (d. h. wärmefreisetzend) und sie sendet Licht- und Wärmestrahlung aus, die sich in der sichtbaren Flamme äußert. Die Oxidationsreaktionen liefern damit die Energie für die überwiegend endothermen (d. h. wärmeverbrauchenden) Vorgänge der Erwärmung, der Trocknung sowie der pyrolytischen Zersetzung (Abb. 5.1).

Außer der von Flammenbildung gekennzeichneten Oxidation ist bei biogenen Festbrennstoffen ebenso die flammenlose Verbrennung bedeutsam. Diese Oxidationsform tritt im Endstadium des Verbrennungsvorganges auf. Der als Endprodukt der pyrolytischen Zersetzung gebildete feste Kohlenstoff (Entgasungsrückstand) wird dabei im Glutbett zuerst vergast (Feststoffvergasung) und anschließend in der Gasphase aufoxidiert /5-7/. Als Verbrennungsrückstand verbleibt die Asche.

Bei Holzfeuerungen ist das Phänomen des „knisternen Feuers“ bekannt. Die Ursache hierfür liegt in dem entweichenden Wasser, das bei der Trocknung bei hohen Temperaturen unter Druck gerät und die Zellwände sprengt. Besonders bei den harzreichen

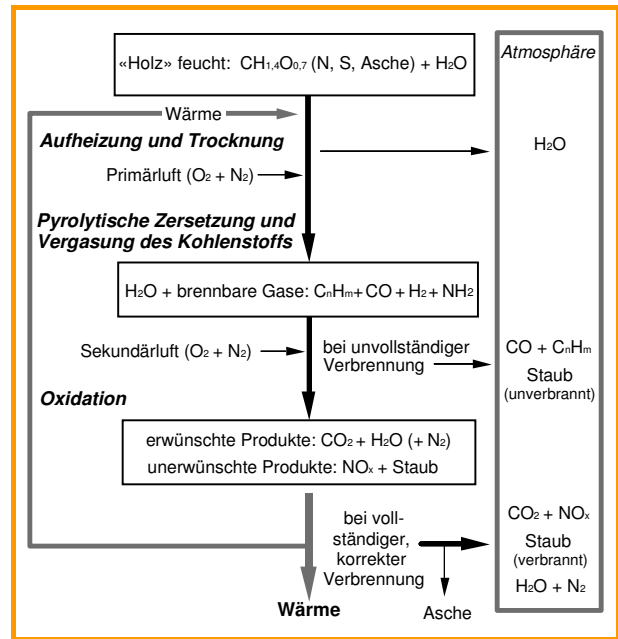


Abb. 5.1: Abbrandverhalten von Holz über Trocknung, Vergasung mit Primärluft und Oxidation der Gase mit Sekundärluft (nicht dargestellt ist der parallel zum Gasausbrand ablaufende Abbrand des Kohlenstoffs mit Primärluft) /5-5/

Nadelhölzern ist dieser Druck sehr hoch, da die Harze ab ca. 60 °C erweichen und somit die radialen Leitungsbahnen im Holz für den Wasserdampfaustritt verstopfen /5-3/.

**Emissionsentstehung.** Die bei der Verbrennung von Biomasse entstehenden luftgetragenen Verbrennungsprodukte können unterteilt werden in Stoffe aus unvollständiger und aus vollständiger Verbrennung (Abb. 5.1) sowie in Schadstoffe aus Spurenelementen bzw. Brennstoffverunreinigungen /5-5/.

Stoffe aus der vollständigen Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserdampf (H<sub>2</sub>O). Sie sind ökologisch unproblematisch, wenn das CO<sub>2</sub> nicht aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammt und somit zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt.

Stoffe aus unvollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind im Wesentlichen:

- Kohlenstoffmonoxid (CO),
- Kohlenwasserstoffe (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, Teere),
- Ruß (brennbarer Teil der Staubemissionen).

Kohlenmonoxid ist ein geruchloses Gas und wird – da es leicht messbar ist – i. Allg. als Indikator für die Güte einer Verbrennung verwendet. Die Kohlenwasserstoffe bilden dagegen eine Stoffgruppe mit wesentlich höheren Umwelt- und Gesundheitsrisiken, sind geruchlich wahrnehmbar und stellen den eigentlichen

Grund für Geruchsbelästigungen dar. Ruß ist dagegen ein fein verteilter, meist geflockter, fast reiner (elementarer) Kohlenstoff, er wird als Syntheseprodukt in fester Form abgeschieden und ist somit der Staubfraktion zuzurechnen.

Die Ursachen für eine unvollständige Verbrennung liegen nur selten in einer ungenügenden Sauerstoffzuführung begründet. Häufig ist die Verbrennungstemperatur in der Ausbrandzone (Oxidationszone) zu gering und die Reaktionen laufen zu langsam ab. Dies ist besonders dann der Fall, wenn zu feuchte Brennstoffe verwendet werden.

Zu einer unvollständigen Verbrennung kommt es aber auch, wenn die Verweilzeit der Reaktionspartner in einer solchen heißen Zone zu gering ist (z. B. auf Grund zu klein dimensionierter Feuerräume). Das ist auch bei feuchten Brennstoffen der Fall; zu hohe Wassergehalte im Brennstoff mindern nicht nur die Verbrennungstemperatur sondern führen auch zu einer Erhöhung des Abgasvolumens, was zwangsläufig ebenfalls mit einer geringeren Aufenthaltszeit im Brennraum verbunden ist. Außerdem kann die Durchmischung der gebildeten Brenngase mit der Verbrennungsluft (Sekundärluft) ungünstig sein, weil beispielsweise nicht genügend Turbulenz im Feuerraum erzeugt wird und die Brenngase somit nicht ausreichend mit Sauerstoff in Kontakt kommen.

Um eine möglichst vollständige Verbrennung zu erreichen sind eine Reihe von technischen Bedingungen zu erfüllen, die u. a. in Kapitel 6 dargestellt sind. Die Freisetzung von Produkten einer unvollständigen Verbrennung lässt sich anhand von Abb. 5.1 nachvollziehen.

Zu den Schadstoffemissionen aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen zählen luftgetragene Aschepartikel (d. h. der nicht-brennbare Teil der Staubemissionen), Schwermetalle (z. B. Cu, Pb, Zn, Cd), Schwefel-, Chlor- und Kaliumverbindungen (d. h.  $\text{SO}_2$ , HCl, KCl), Dioxine und Furane sowie Stickstoffverbindungen (d. h. NO,  $\text{NO}_2$ , HCN,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ).

Eine besondere Bedeutung haben hierbei die Stickoxidemissionen NO und  $\text{NO}_2$  (zusammengefasst  $\text{NO}_x$ ). Sie entstehen im Wesentlichen aus dem im Brennstoff gebundenen Stickstoff, der von ca. 0,15 % (Holz) über 0,45 % (Stroh) bis ca. 4 % (Rapskörner) in einem relativ weiten Bereich schwanken kann (vgl. Kapitel 4). Allerdings wird der Brennstoffstickstoff bei der Verbrennung größtenteils in molekularen Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und nicht zu  $\text{NO}_x$  umgewandelt. Ein sehr geringer Teil des Stickstoffs wird außerdem in die Asche eingebunden.

Die zweite wichtige  $\text{NO}_x$ -Bildungsursache ist die Reaktion von Luftstickstoff mit Sauerstoff. Hierfür müssen aber sehr hohe Temperaturen von mehr als 1.300 °C vorliegen; sie kommen jedoch bei der Biomasseverbrennung allenfalls örtlich und kurzzeitig vor. Daher spielt dieser Bildungsmechanismus nur bei den stickstofffreien Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas eine größere Rolle, da hier höhere Verbrennungstemperaturen auftreten.

### 5.3 Anforderungen an die Feuerungskonstruktion

Um einen hohen Wirkungsgrad und geringe Schadstoffemissionen zu erzielen, muss die Feuerungstechnik den besonderen Eigenschaften der biogenen Festbrennstoffe Rechnung tragen. Zu diesen besonderen Eigenschaften zählt vor allem der relativ hohe Gehalt flüchtiger Substanzen (Kapitel 5.1). Daraus leiten sich bestimmte konstruktive Anforderungen ab. Ausgehend von den in Kapitel 5.2 dargestellten Grundlagen lassen sich die wichtigsten Voraussetzungen für eine vollständige Brennstoffumsetzung wie folgt zusammenstellen:

- Zufuhr von Oxidationsmittel (Luft) im Überschuss,
- ausreichend lange Verweilzeit des Brenngas/Luftgemisches in der Reaktionszone,
- ausreichend hohe Verbrennungstemperatur und
- gute Vermischung der Brenngase mit Verbrennungsluft durch hohe Turbulenz.

Um vor diesem Hintergrund sowohl die Leistung als auch den Verbrennungsablauf einer Feuerungsanlage regeln zu können, wird versucht, die Feststoffumsetzung mit der Primärluftzuführung (im Glutbett) räumlich vom Gasausbrand mit der Sekundärluftzuführung (in der Nachbrennkammer) zu trennen. Beide Zuluftströme sollten getrennt regelbar sein. Die Primärluft beeinflusst damit die Feuerungsleistung, während die Sekundärluft hauptsächlich für die vollständige Verbrennung der brennbaren Gase verantwortlich ist.

Die geforderten hohen Temperaturen in der Sekundärverbrennungszone sind zumindest bei größeren Feuerungen meist problemlos realisierbar. Durch eine gute Vermischung der Brenngase mit Verbrennungsluft und eine hohe Verbrennungstemperatur kann der Luftüberschuss so gering wie möglich gehalten werden, um die Feuerung optimal und (nahezu) ohne Emissionen unverbrannter Gase betreiben zu können. Ein niedriger Luftüberschuss ist auch Voraussetzung für die Nutzung von feuchteren

Brennstoffen. Hier senkt der Energieverbrauch für die Verdampfung des Wassers das Temperaturniveau im Feuerraum tendenziell weiter ab und der entstehende Wasserdampf erhöht zusätzlich den Abgasvolumenstrom und dadurch den Energieaustrag aus der heißen Zone. Bei einem geringstmöglichen Luftüberschuss ist gleichzeitig auch der Wirkungsgrad am höchsten.

Neben der Optimierung des Luftüberschusses ist eine ausreichend hohe Verbrennungstemperatur durch Vermeiden unnötiger Wärmeabgabe im Feuerraum sicherzustellen. Dies geschieht meist durch eine wärmedämmende Auskleidung des Primär- und Nachverbrennungsraumes. Als feuerseitige Dämmmaterialien werden hierfür beispielsweise Schamotte, feuerfester Beton, Lava-Ton oder Keramikfasermaterialien verwendet. Für die meisten Feuerungsprinzipien gilt, dass der Hauptteil der Nutzwärme nicht schon im Feuerraum, sondern erst in einem vom Feuerraum getrennten Wärmeübertrager aus den heißen ausgebrannten Verbrennungsgasen gewonnen wird. Durch den verbesserten Gasausbrand in der Nachbrennkammer werden auch die Teerbildung und Rußablagerungen an den Wärmeübertragerflächen vermindert.

Eine frühzeitige Wärmeentnahme kann aber bei trockenen Brennstoffen oder speziellen Einsatzgebieten sinnvoll sein. Das ist der Fall, wenn zur Regulierung der Glutbetttemperaturen eine Abkühlung durch gezielte Nutzwärmeentnahme erwünscht ist (z. B. bei Brennstoffen, deren Aschen zur Verschlackung neigen, Kapitel 4). Bei Rostfeuerungen kommen hierzu wassergekühlte Roste zum Einsatz; dies ermöglicht einen Betrieb ohne überschüssige, als Kühlluft eingesetzte, Primärluft. Auch können für trockene Brennstoffe wassergekühlte Feuerraumwände eingesetzt werden, die eine gesteuerte Wärmeabnahme erlauben (Kapitel 6).

Die genannten feuerungstechnischen Anforderungen werden gelegentlich als sogenannte „3-T-Regel“ für die Feuerungskonstruktion zusammengefasst („Time-Temperature-Turbulence“). D. h. dass die Durchmischungsintensität, Verweilzeit und Verbrennungstemperatur die wesentlichen zu optimierenden Bestimmungsgrößen darstellen. Das gilt insbesondere für biogene Festbrennstoffe mit ihrem hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen.

## 5.4 Feuerungstechnische Besonderheiten der Beschickungsarten

In der Feuerungstechnik werden die beiden Gruppen der hand- und automatisch beschickten Anlagen unterschieden. Auf Grund der Unterschiede im Feuerungsablauf (kontinuierliche bzw. chargenweise Verbrennung), die die jeweilige Art der Beschickung mit sich bringt, werden diese Unterschiede nachfolgend zunächst erläutert, bevor anschließend in Kapitel 6 die eigentlichen Feuerungstechniken vorgestellt werden.

In automatisch beschickten Anlagen wird ein durch Zerkleinerung oder Pelletierung hergestellter, leicht dosierbarer Brennstoff eingesetzt. Dieser kann somit weitgehend kontinuierlich und automatisch in den Feuerraum eingebracht werden, um einen gleichbleibenden Feuerungsbetrieb mit konstanter Leistung einzustellen. Die gleichmäßige Brennstoffzuführung erlaubt eine an diese Brennstoffmenge angepasste Luftmengendosierung bei gleichbleibenden Temperaturen im Feuerraum. Eine derartige Optimierung führt letztlich auch zu entsprechend gleichbleibenden und relativ geringen Schadstofffreisetzungen (Abb. 5.2).

Die automatische Zuführung der schüttfähigen Brennstoffe erlaubt außerdem eine kontinuierliche Anpassung der Brennstoffmenge an den wechselnden Wärmebedarf. Automatisch beschickte Anlagen sind daher meist über einen relativ weiten Bereich teillastfähig (ca. 30 bis 100 % der Nennwärmeleistung). Wärmespeicher zur Überbrückung von Phasen mit niedriger Wärmenachfrage können deshalb relativ klein dimensioniert oder – unter bestimmten Bedingungen – auch ganz weggelassen werden.

Im Vergleich zu Anlagen mit automatischer Beschickung weisen diskontinuierlich von Hand beschickte Feuerungen ausgeprägte Schwankungen im zeitlichen Verlauf der Verbrennungsqualität auf. Dies gilt insbesondere für Anlagen ohne Gebläse („Naturzuganlagen“), zu denen die meisten Einzelfeuerstätten zählen (Kapitel 6). Hier wechseln die Randbedingungen der Verbrennung zwischen zwei Nachlegezeitpunkten erheblich. Mit dem Einschichten einer neuen Brennstofffüllung bewirkt der kalte und noch feuchte Brennstoff sowie das Öffnen der Fülltür zunächst eine Abkühlung. Gleichzeitig nimmt das Füllvolumen im Feuerraum während der anschließenden kontinuierlichen Abbrandphase ab, weshalb man auch vom „Chargenabbrand“ spricht. Mit dem veränderlichen Füllvolumen ändert sich bei vielen Feuerungsbauarten auch die Verweilzeit der



gebildeten Brenngase. Die sich ständig ändernden Verbrennungsbedingungen lassen sich an der Konzentration des gebildeten Kohlendioxids ( $\text{CO}_2$ ) und des Kohlenstoffmonoxids ( $\text{CO}$ ) im Abgas ablesen (Abb. 5.2).

Für die abbrandphasenbezogene Dosierung der Luftzufuhr ergeben sich hieraus bestimmte Konsequenzen (Kapitel 6). Diese lassen sich am besten umsetzen, wenn ein Gebläse verwendet wird, durch welches die Luftmenge an den momentanen Verbrennungszustand angepasst werden kann. Durch geeignete Feuerungskonstruktionen wird außerdem versucht – wie bei automatisch beschickten Anlagen – einen möglichst gleichmäßigen Abbrand mit konstanter Leistung und geringen Emissionen zu erreichen. Das Nachlegen des Brennstoffs und das veränderliche Füllvolumen sollen dabei einen möglichst geringen Störeinfluss ausüben.

Ein Feuerungsprinzip, bei dem diese Forderungen auch bei handbesckichten Feuerungen besonders konsequent umgesetzt wurden, stellt der sogenannte „untere Abbrand“ dar. Hier nimmt nur die unterste Schicht des Brennstoffbetts an der Verbrennung teil (Kapitel 6). Der Verlauf der  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CO}$ -Konzentration im Abgas (Abb. 5.2, Mitte) zeigt eine gute Annäherung an den weitgehend gleich bleibenden Betriebszustand einer automatisch beschickten Feuerung.

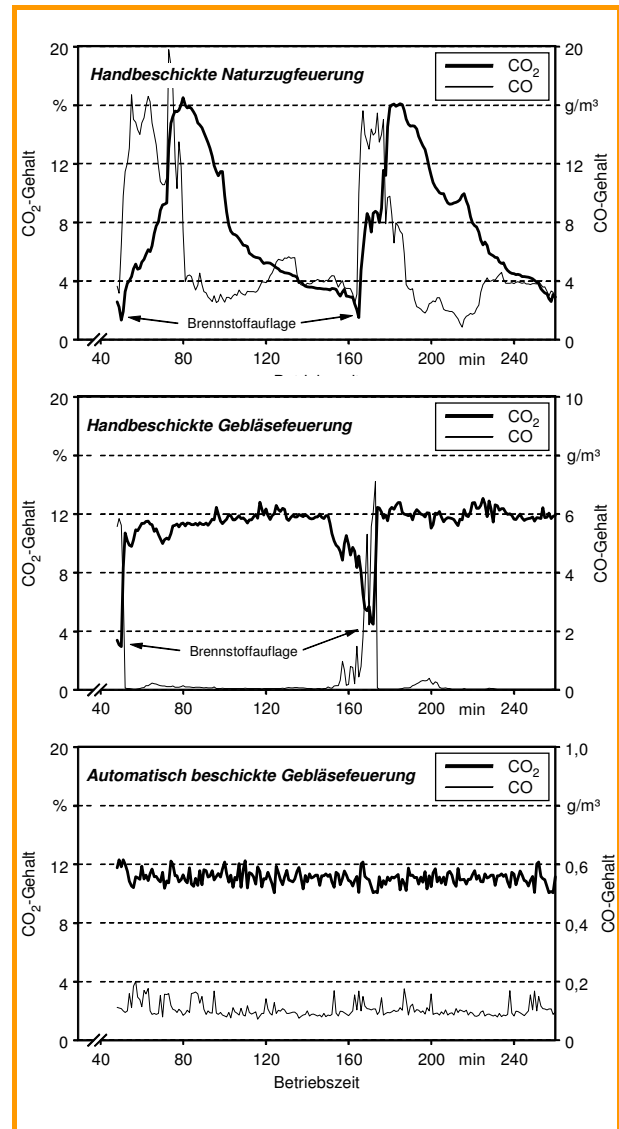


Abb. 5.2: Typischer Verlauf der Kohlendioxid( $\text{CO}_2$ )- und Kohlenmonoxid( $\text{CO}$ )-Konzentrationen im Abgas einer Naturzugfeuerung (Kachelofeneinsatz), einer handbesckichten Gebläsefeuerung (Stückholzkessel, unterer Abbrand) und einer automatisch besckichten Feuerung (Hackgutkessel) im betriebswarmen Zustand (Anheizphase nicht dargestellt) (nach /5-6/)