Filtertyp	Abscheidegrad %	Gasgeschw. m/s	Druckverlust mbar	Energiebedarf kWh / 1000 m^3/h
Zyklon	85 – 95 *	15 – 25	6 – 15	0,3 – 0,65
Gewebefilter	99 – 99,99	0,5 – 5	5 – 20	0,75 – 1,9
Trocken-Elektroabscheider	95 – 99,99	0,5 – 2,0	1,5 – 3,0	0,26 – 1,96
Nass-Elektroabscheider	95 – 99,99	0,5 – 2,0	1,5 – 3,0	0,17 – 2,3

Typische Merkmale von Staubabscheideverfahren (von Turegg 1997). * Für Feinpartikel < 1 μm gegen 0.

Fliehkraftabscheider

Abscheideprinzip: In einem zylindrischen Abscheideraum werden durch rotierende Strömungen des zu reinigenden Gases hohe Fliehkräfte erzeugt, welche die Staubpartikel zur Aussenwand schleudern. An dieser sinken sie auf schraubenförmiger Bahn in den Staubbunker, das gereinigte Gas strömt durch ein zentrales Rohr ab. Wichtig für das einwandfreie Funktionieren von Trägheitsentstaubern ist die Dichtheit, insbesondere der Staubaustragung. Der Entstaubungsgrad hängt im wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Korngrösse
- Dichte der Partikel
- Geometrische Abmessungen und (ebenfalls als Folge der Geometrie:)
- Druckverlust.

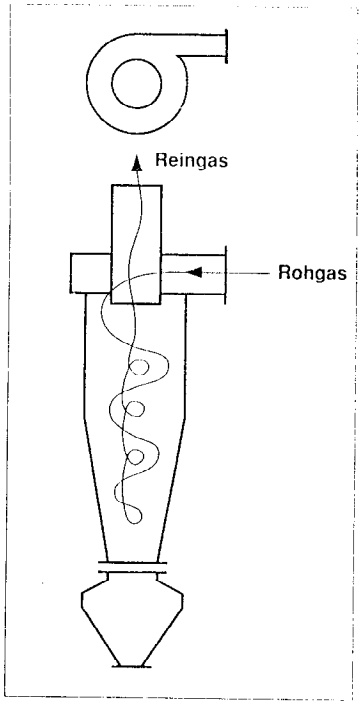


Bild 26 Zyklon

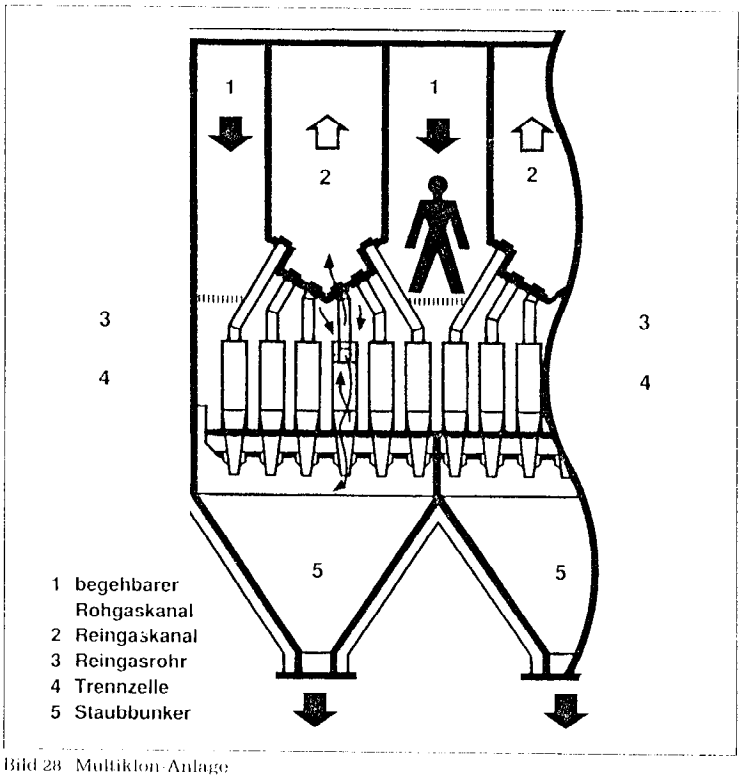
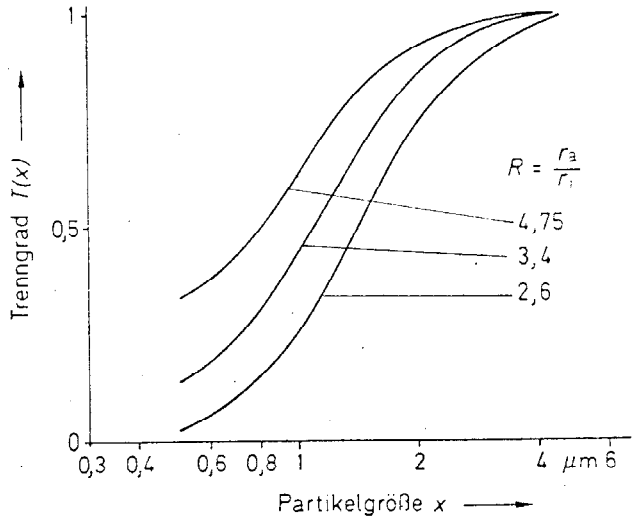


Bild 28 Multiklon-Anlage

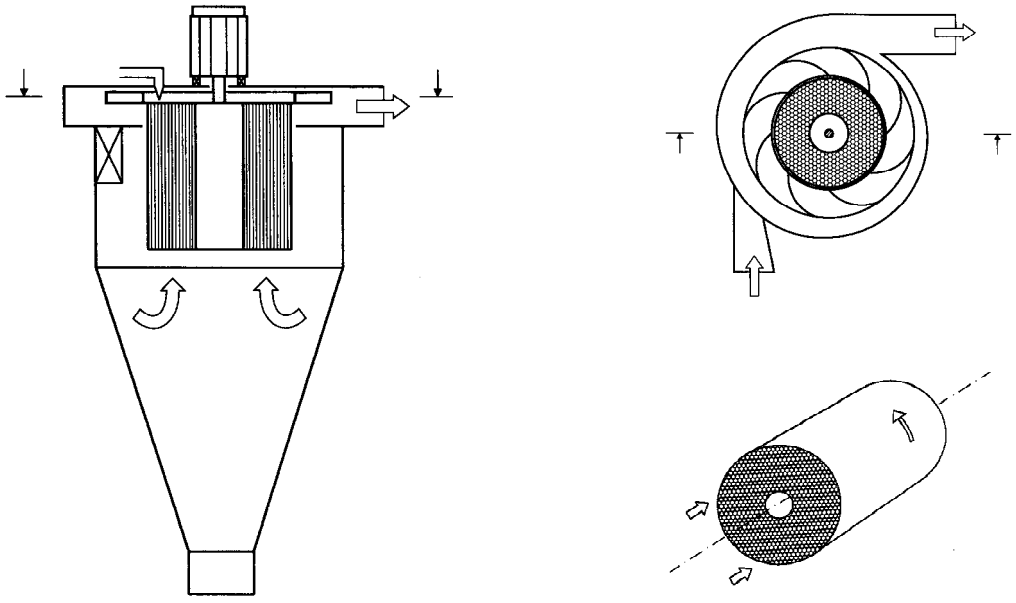
Schema eines Zyklons mit Staubaustragung (links) und einer Multizyklonanlage (rechts). Quelle: Lurgi 1990.

Zur Verbesserung des Abscheidegrades werden Fliehkraftabscheider meist in Form von Multizyklonen ausgeführt, in denen der Gasstrom auf mehrere kleine Einzelzyklone aufgeteilt wird. Im weiteren kann die Abscheidewirkung auch durch Serieschaltung von Zyklonen verbessert werden. Der Abscheidegrad ist jedoch physikalisch begrenzt aufgrund des Verhältnisses von Reibungskraft (proportional r^2) und Trägheitskraft (proportional r^3).

Abscheidewirkung: Je nach Körnung und Staubart können Partikel ab ca. (1)...2 bis 5 µm abgeschieden werden. Typische Reingaswerte, die durch den Einsatz von Zyklonen in Feststofffeuerungen erzielt werden liegen im Bereich von 50 - 200 mg/m^3. Für Grossanlagen ist der Einsatz von Trägheitsentstaubern allein damit nicht ausreichend zur Einhaltung der Grenzwerte.



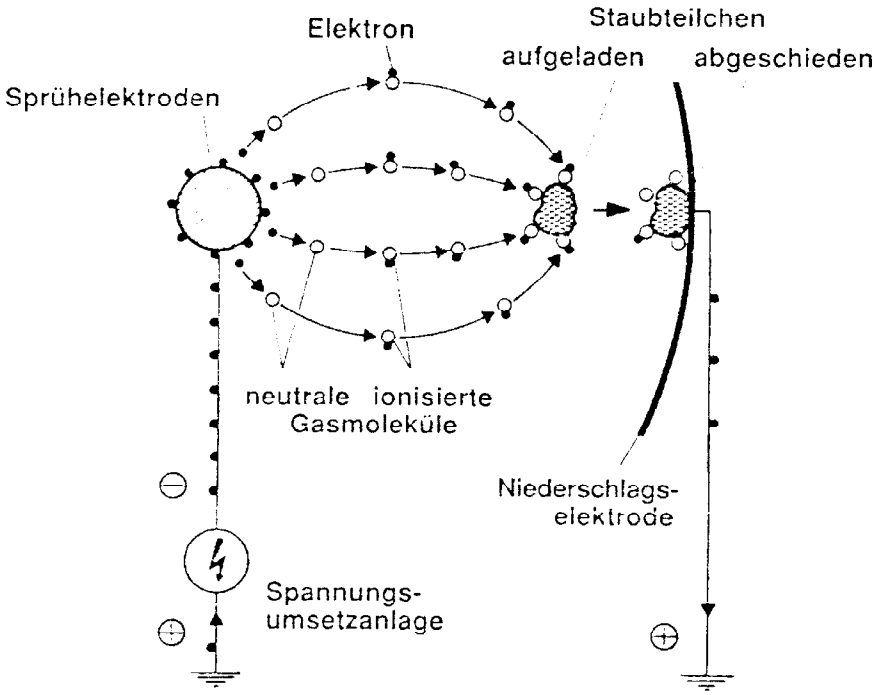
Abscheidegrad eines Zyklons in Abhängigkeit vom Tauchrohrradius (R) nach Barth.



Rotierender Partikelseparator (RPS) in tangentialer Bauart [Brouwers 1996].
Querschnitt (links), Schnitt von oben (rechts oben) und rotierendes Wabenelement (rechts unten).

Elektrische Abscheider (auch elektrostatische Abscheider)

Abscheideprinzip: Die Staubteilchen und Nebeltröpfchen im Gas werden negativ aufgeladen und unter dem Einfluss eines starken elektrischen Feldes zu den Niederschlagselektroden transportiert und dort abgeschieden. Zwischen den Elektroden liegt eine Gleichspannung an, die je nach Filterbauart und Anwendungsfall zwischen 20'000 V bis über 100'000 V beträgt. In der Nähe der Sprühelektroden kommt es aufgrund der hohen Feldstärke zu Corona-Entladungen, so dass Elektronen freigesetzt werden. Die entstehenden negativen Gasteilchen lagern sich an die Staubteilchen oder Nebeltröpfchen an, so dass diese unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zur Niederschlags-elektrode wandern, ihre Ladung zum Teil abgeben und haften bleiben. Durch Klopfeinrichtungen wird die Niederschlagselektrode periodisch abgereinigt, so dass die Staubteilchen in die Staubaustragung fallen. Elektrische Abscheider werden oft auch als Elektrofilter bezeichnet. Diese Bezeichnung ist allerdings nicht zutreffend, da zwischen elektrischen und filternden Abscheidern zu unterscheiden ist und das Abscheideprinzip eines Elektroabscheiders nicht auf einer Filtration basiert.



Der *Abscheidegrad* ε kann nach der Gleichung für elektrische Abscheider von W. Deutsch aus dem Jahr 1922 wie folgt bestimmt werden:

$$\varepsilon = \frac{c_{Rohgas} - c_{Reingas}}{c_{Rohgas}} = 1 - \exp\left(-w \frac{A}{\dot{V}}\right)$$

w = Wanderungsgeschwindigkeit der Teilchen

A = Niederschlagsfläche

$\dot{V}$ = Gasvolumenstrom

$\frac{A}{\dot{V}}$ = 1/v wobei v = Filterflächenbelastung in [m^2 / m^3 s]

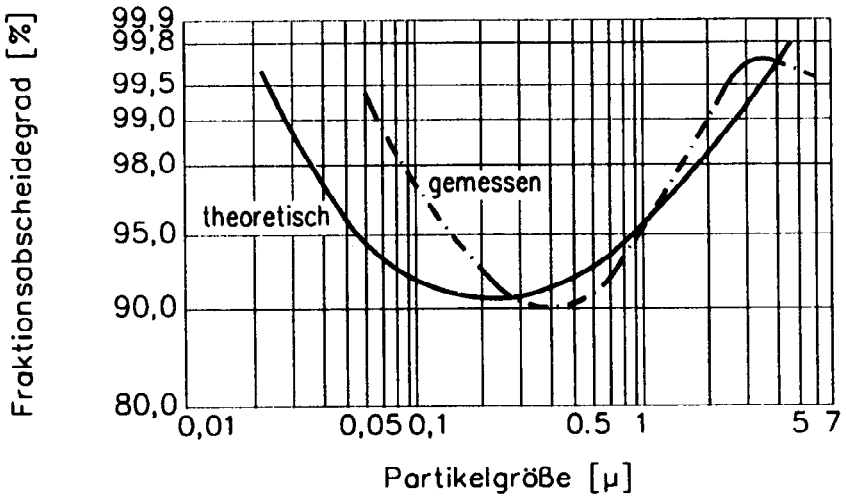
Die Wanderungsgeschwindigkeit w hängt ihrerseits vor allem von folgenden Parametern ab: Temperatur, Druck, Gaszusammensetzung, Korngrössenverteilung, elektrische Feldkräfte u.a..

Bei gegebenem Volumenstrom, verlangtem Abscheidegrad und Kenntnis des abzuscheidenden Staubes kann mit der Gleichung für Elektroabscheider die erforderliche Niederschlagsfläche bestimmt werden.

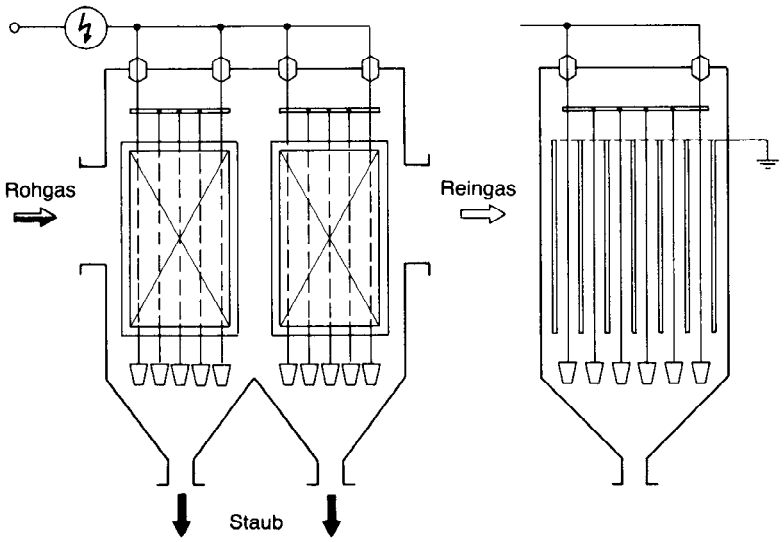
Das in Elektroabscheidern angewandte physikalische Prinzip unterliegt – im Gegensatz z.B. zu Trägheitsentstaubern – keiner Einschränkung hinsichtlich der Feinheit der abzuscheidenden Partikel (mit Einschränkung des unten beschriebenen Abscheideminimums zwischen 0,1 bis 1 μm) und es können theoretisch unbegrenzt hohe Abscheidegrade erzielt werden. Die Grenzwerte von 50 mg/m^3 (Feststofffeuerungen > 5 MW) bzw. 30 mg/m^3 (KVA) können problemlos eingehalten werden. Unter diealen Voraussetzungen sind typische Staubgehalte von (1...) 5 - 15 mg/m^3 möglich.

Vorteil von Elektroabscheidern im Vergleich zu Gewebefilter: Relativ geringer Druckverlust, unempfindlich gegen Funkenflug. Nachteil: Transformatorenstation aufwendig, Stromverbrauch.

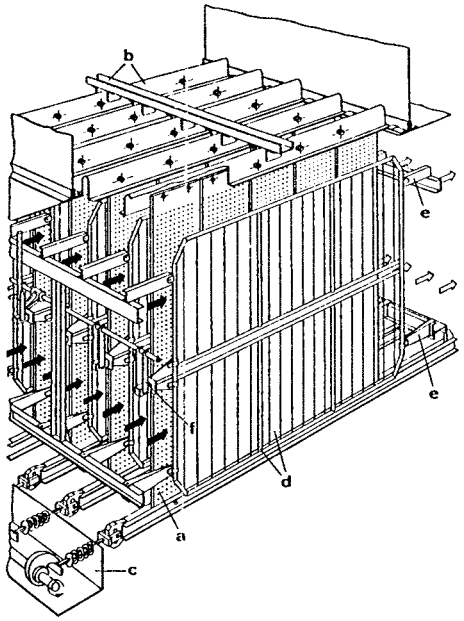
Wichtigste Bauarten von ausgeführten Elektroabscheidern sind Platten-, Segment-, Waben- oder Röhrenabscheider. Typische Betriebstemperaturen liegen um 130˚C, für spezielle Anwendungen sind jedoch auch Sonderbauformen für höhere Temperaturen gebräuchlich.



Fraktionsabscheidegradekurve beim trockenen Elektroabscheider nach [von Turegg 1997]

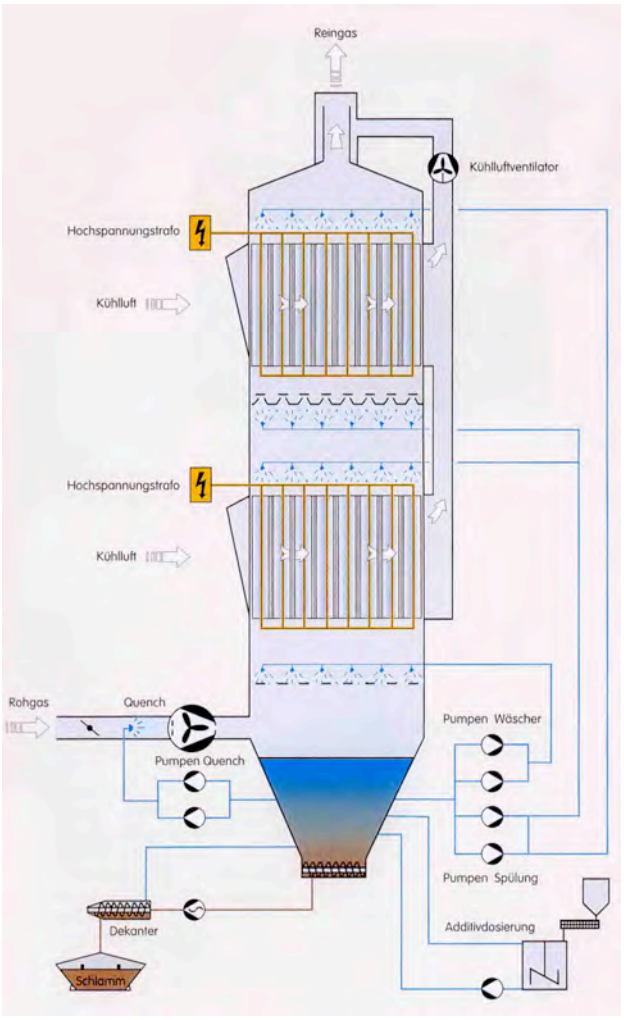


Schmatischer Aufbau eines Zwei-Kammer Plattenelektroabscheiders [Fritz und Kern 1990]



Technische Ausführung eines Elektrofilters für Großkraftwerke [8.10]

a: Niederschlagselektroden, b: Aufhängung der Niederschlagselektroden, c: Klopfeinrichtung zur Reinigung der Niederschlagselektroden, d: Sprühelektroden, e: Aufhängeträger für Sprührahmen, f: Klopfhämmer für Sprührahmen



Zweistufiger Nasselektroabscheider in Röhrenbauweise für Spanplattenindustrie (Scheuch)

Zur Abscheidung hochohmiger (schlecht leitender) Stäube, wie z.B. in der Zementindustrie, wird dem Elektrofilter ein **Verdampfungskühler** vorgeschaltet, in welchem das Gas gekühlt und der Wassertaupunkt erhöht wird. Dadurch kann die Abscheideleistung im Elektrofilter entscheidend verbessert werden. Die Abscheidung im Elektrofilter erfolgt trocken.

Die Abscheideleistung kann durch **Konditionierung mit SO_3** in der Grössenordnung von 15 ppm um 1 bis 2 Zehnerpotenzen verbessert werden. Nachteil dabei ist die Notwendigkeit der Bereitstellung von SO_3, was z.B. durch Verbrennung von elementarem Schwefel geschieht.

Nass-Elektrofilter sind eine Sonderbauform zur Reinigung feuchter, gesättigter Gase. Im Gegensatz zu Trockenelektrofiltern entfallen die Klopfeinrichtungen, da der Flüssigkeitsfilm kontinuierlich abläuft. Dagegen ergeben sich im Vergleich zu trocken arbeitenden Filtern vor allem folgende Nachteile:

- Notwendigkeit der Schlammaufbereitung zu festen Rückständen und Wasser
- Nachbehandlung des Wassers
- Zur Vermeidung von Wasserdampffahnen ist eine Wiederaufheizung erforderlich.

Filternde Abscheider: Gewebefilter, Schüttschichtfilter, Keramikfilter

Abscheideprinzip: Haftkräfte, Adsorption. Beispiel: Staubsauger

Strömen staubhaltige Gase durch eine poröse Gewebe- oder Filzschicht, so wird der Staub vom Trägergas getrennt und lagert sich an der Filterschicht ab. Der Staub wird periodisch abgereinigt, in der Regel durch Rückspülen mit gereinigtem Gas oder mit Druckluft. Als Filtermaterial werden Gewebe- oder Fliessstoffe aus Natur- und Kunstfasern sowie anorganisches Fasermaterial eingesetzt (Glas-, Mineral- oder Metallfasern).

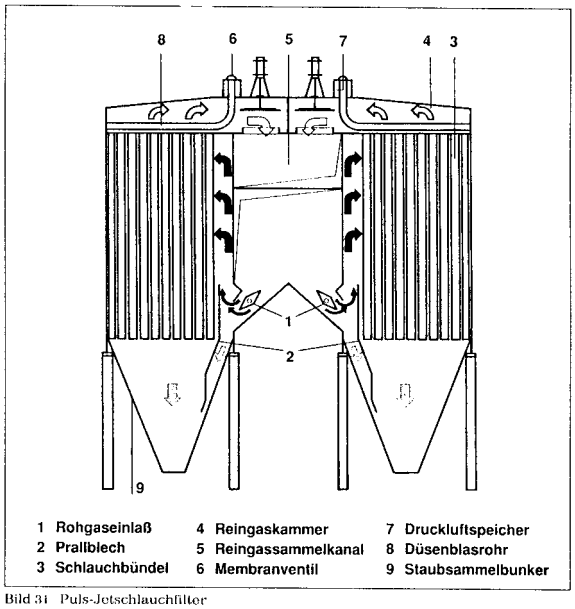


Bild 31 Puls-Jetschlauchfilter

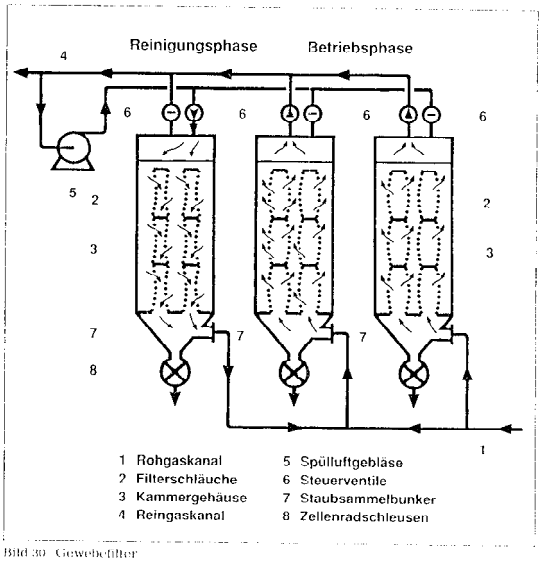
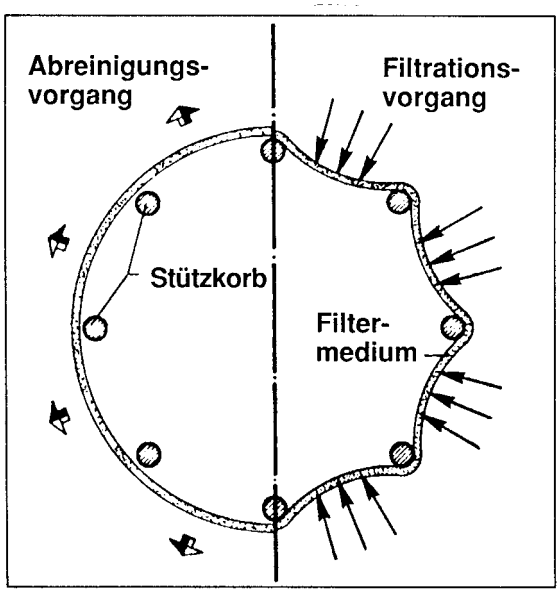


Bild 30 Gewebefilter



Schlauchquerschnitt

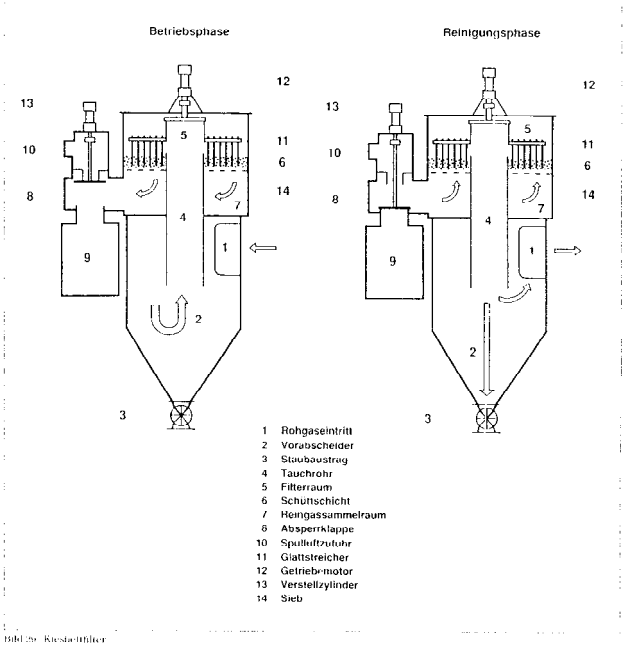


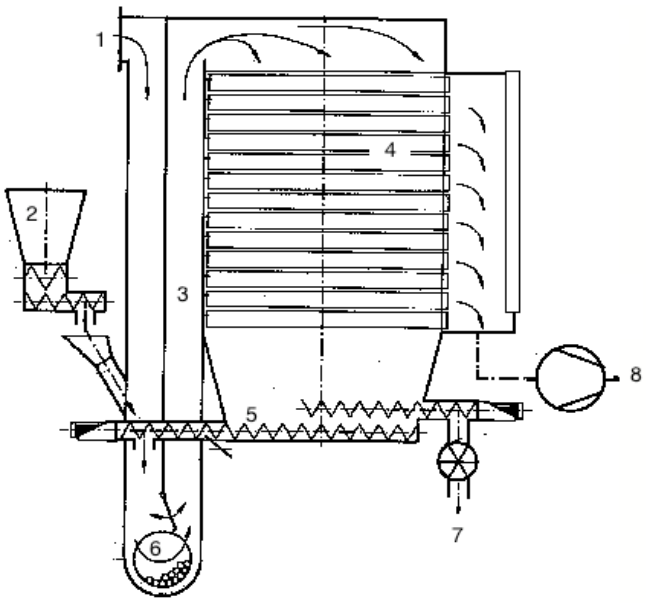
Bild 32 Kiesschichtfilter

Bei Schüttschichtfiltern kommt eine Kombination von Fliehkraftabscheidung zur Vorreinigung mit nachgeschalteter Feinreinigung durch Filterung zur Anwendung. Beim Durchströmen durch das Filtermedium erfolgt eine Agglomeration der Teilchen, so dass Entstaubungsgrade bis zu 99.9% erzielt werden können.

Typische Druckverluste filternder Abscheider: 10 bis 20 mbar.
Typische Reingaswerte: 1 bis 20 mg/m3.
Zulässige Gastemperaturen für Gewebefilter: bis ca. 250˚C
Zulässige Gastemperaturen für Schüttschicht- und Keramikfilter: bis ca. 450˚C.

Vorteile:
Adsorption von Schadstoffen auf dem Filterkuchen möglich (SO_2 falls Staub durch hohen Mineralstoffanteil basisch).
Kombination mit Kalkeindüsung zur Entfernung von HCl, SO_2 möglich mit geringem Mehraufwand.

Nachteile:
Undichtheiten vermindern die Abscheideleistung drastisch (Haarrisse, Löcher im Gewebe).
Bei Gewebefiltern zudem: Anfälligkeit gegen Funkenflug und Brandgefahr, hohe Kosten bei Ersatz.



Legende:
1: Staubbeladenes Rohgas
2: Sorptionsmitteldosierung
3: Strömungsreaktor
4: Filterschläuche
5: Sorptionsmittel- und Asche-rückführung
6: Kugelmühle zur Mahlung des Sorptionsmittels
7: Ascheaustragung
8: Reingas

Gewebefilter mit Sorptionsmittelzugabe in Kugelreaktor und Sorptionsmittelrückführung (Lühr).

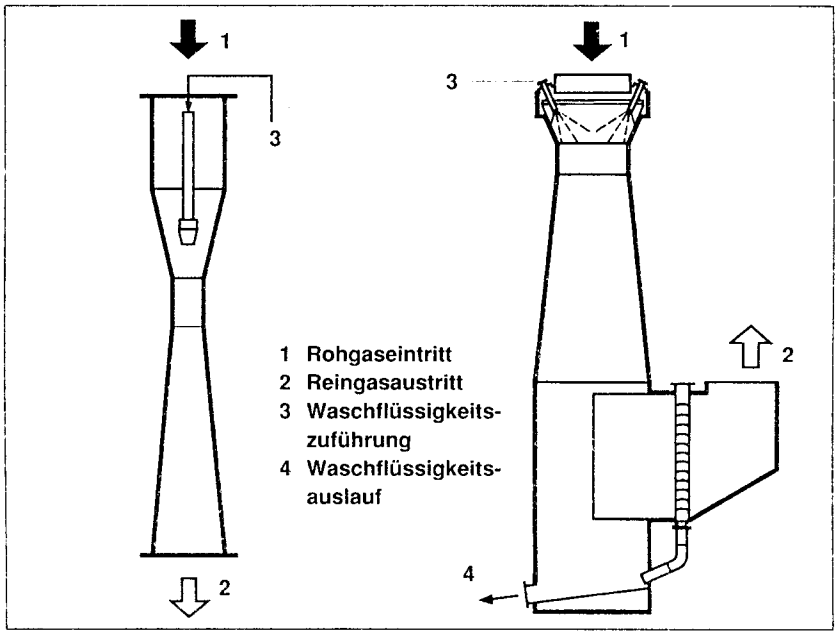
Wäscher

Abscheideprinzip: Durch Beschleunigung und Verzögerung des Gasstromes und der eingedüsten *Waschflüssigkeit* werden Gas, Staub und Flüssigkeitstropfen stark miteinander verwirbelt. Die Staubteilchen werden dadurch benetzt und agglomerieren und allfällige chemische Reaktionen werden beschleunigt. In einem nachgeschalteten Abscheider werden die Flüssigkeitstropfen und der benetzte Staub vom Gasstrom getrennt. Zur Abscheidung werden vorwiegend Fliehkraftabscheider oder Nass-Elektrofilter eingesetzt. Der Reinigungsgrad und der Energiebedarf werden vom Differenzdruck über die Waschzone bestimmt, der zwischen 2 mbar bis 400 mbar (!) und mehr betragen kann. Zur Entstaubung auf Reingaswerte von unter 5 mg/m^3 sind extrem hohe Druckdifferenzen erforderlich, was mit einem entsprechenden Energieverbrauch verbunden ist. Geringere Druckdifferenzen sind ausreichend, wenn Nasswäscher zur Konditionierung vor einem Nass-Elektrofilter eingesetzt werden.

Wichtigste Bauarten: Wäscher können bei unterschiedlichen pH-Werten betrieben werden und so zum Beispiel in Serie zur Abscheidung von basischen und sauren Schadstoffen eingesetzt werden. Kolonnenwäscher sind aufgrund der beschränkten Abscheideleistung nur bedingt geeignet zur Abscheidung von Partikeln. Zur Erzielung niedriger Reingasgehalte z.B. bei der Abscheidung von schwermetallhaltigen Abgasen werden häufig eingesetzt:

Venturiwäscher, vorwiegend zur Vorreinigung. Druckverluste: 2 bis 50 mbar.

Radialstromwäscher werden in ein- oder mehrstufiger Bauweise ausgeführt. Durch einen verstellbaren Ringquerschnitt kann bei schwankender Gasmenge ein konstanter Druckverlust und damit ein gleichbleibender Reinigungsgrad eingehalten werden. Druckverluste: 15 bis 400 mbar.



Venturi-Wäscher

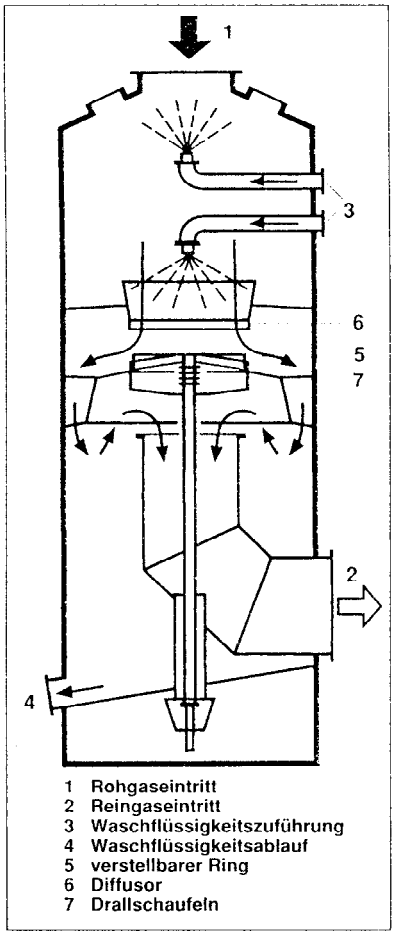


Bild 35 Einstufiger Radialstromwäscher

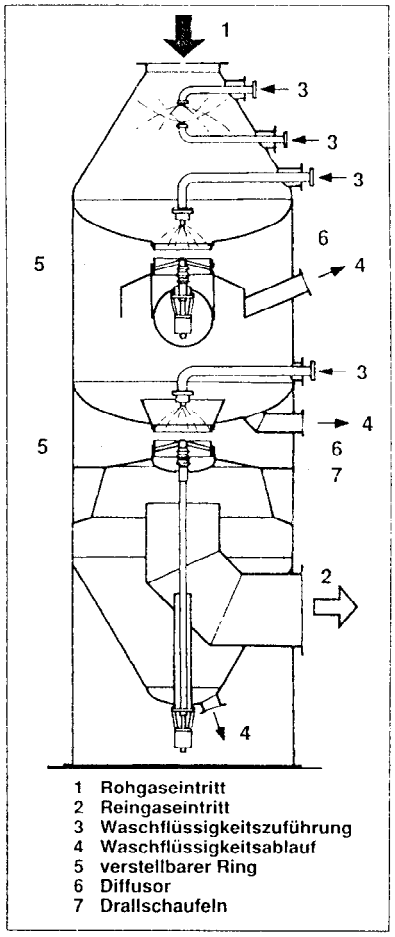


Bild 36 Zweistufiger Radialstromwäscher

6.6 Schwefelemissionen

Die wirksamste Methode zur Verminderung der SO_2-Emissionen ist die Entschwefelung des Brennstoffs vor der Verbrennung. Bei Festbrennstoffen wie z.B. Kohle ist eine direkte Entschwefelung nicht möglich. Dagegen kommen folgende Verfahren für eine SO_2-arme Nutzung in Frage:

a) Vergasung

Vergasung der Kohle mit anschliessender Entschwefelung des Rohgases und Verbrennung des gereinigten Gases in einer Gasturbine oder in einem Kessel. Der Schwefel wird dabei meist in der Form von H_2S in einer Waschstufe (z.B. Methanolwäsche) bei tiefer Temperatur aus dem Gas entfernt (Kugeler):

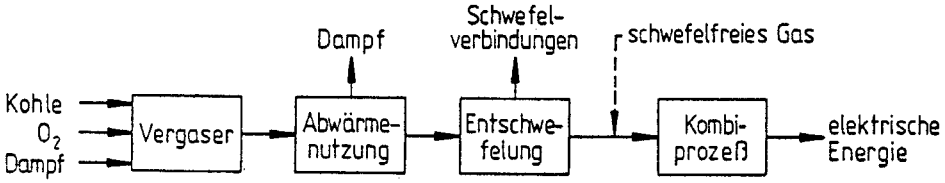


Abb. 8.10. Verfahrenskombination zur Erzeugung von schwefelfreiem Brenngas und Verstromung im Kombiprozeß

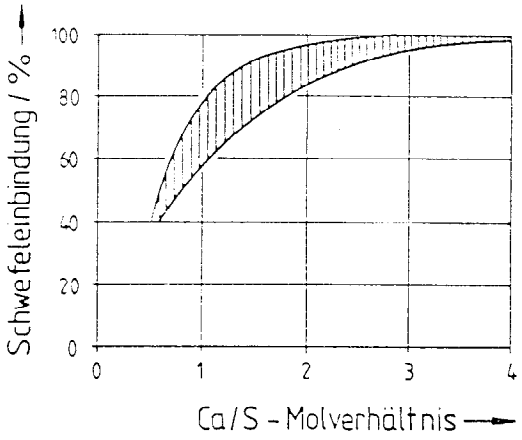
b) In situ-Entschwefelung in der Wirbelschicht

Verbrennung in der Wirbelschicht unter Zugabe eines schwefelbindenden Hilfsstoffs. Aufgrund der vergleichsweise tiefen Verbrennungstemperatur von ca. 800-1000˚C eignet sich die Wirbelschicht für eine in situ-Entschwefelung durch Beigabe von Kalkstein. Das SO_2 wird dabei über Reaktionen vom Typ

$CaCO_3$ (Kalk) –> CaO (gebrannter Kalk) + CO_2

$CaO + SO_2 + 0.5\ O_2$–> $CaSO_4$ (Gips)

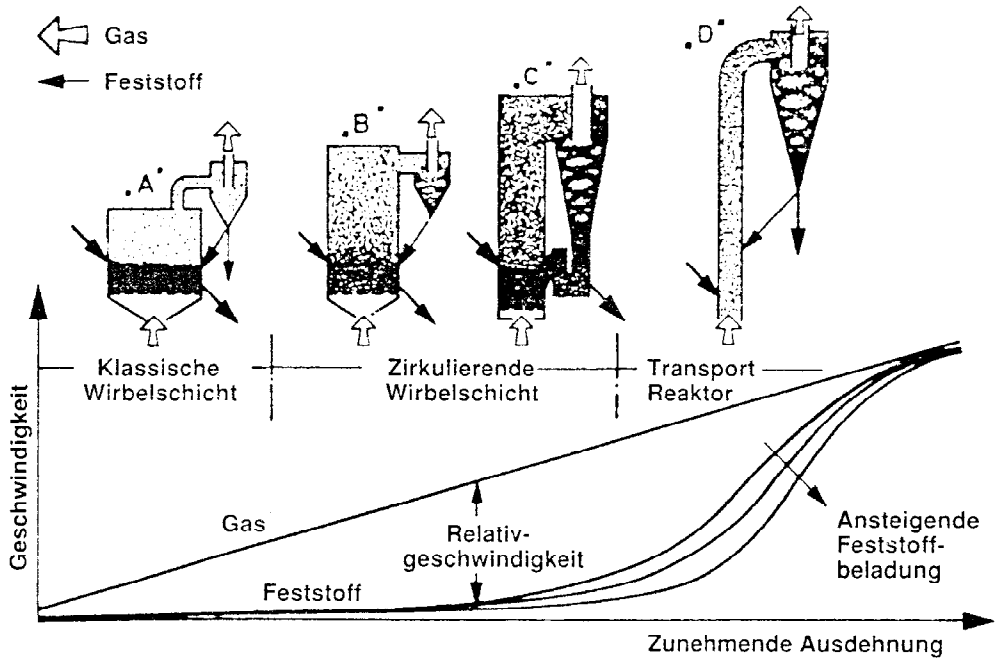
gebunden und kann in Form von Gips aus dem Reaktor abgezogen werden.



Schwefeleinbindung in Abhängigkeit vom Ca/S-Verhältnis bei der Entschwefelung in der Wirbelschicht.

Der Entschwefelungsgrad hängt im wesentlichen ab von der Kalksteinmenge (Verhältnis Ca/S), der Verweilzeit, der Korngrösse und der Temperatur. Optimale Temperaturen liegen bei etwa 850˚C. Bei einem Molverhältnis von Ca/S = 3 kann eine weitgehende Schwefeleinbindung (> 95%) erzielt werden.

Das Prinzip der Wirbelschicht eignet sich für verschiedenartige Reaktionen zwischen Feststoffen und Gasen. Nebst der Verbrennung wird es auch eingesetzt für die Vergasung, zur Entfernung von Schadstoffen aus Feststoffschüttungen sowie für verschiedene heterogene Reaktionen.



Vorteile der Wirbelschicht gegenüber Festbettreaktoren:

- Guter Stoffübergang von Gas zu Feststoff und sehr guter Wärmeübergang durch intensive Vermischung
- Durch die grossen Wärmekapazität des Bettmaterials (Sand, Quartz; inert) ist eine Entkopplung von Wärme- und Stoffhaushalt möglich (Fliessbettkühler). Dadurch ist eine Verbrennung bei einer annähernd konstanten Temperatur möglich, die deutlich unter der adiabaten Temperatur eingestellt werden kann von Vorteil ist.
- Annähernd homogene Vermischung (fluidähnlicher Zustand)
- Verwendung feinkörniger Feststoffe möglich z.B. zur Adsorption, damit guter Stoffübergang im Feststoff
- Lange Verweilzeit der Feststoffpartikel in der Reaktionszone (mehrmaliger Umlauf). Verweilzeitverhalten der Gase entspricht einem PSR, der Feststoffe einem IDR.

Vorteile bei der Verbrennung:

- Verbrennung bei tiefer Temperatur möglich durch hohen Anteil an Trägermedium (Bettmaterial); Entkopplung von Wärme- und Stoffhaushalt möglich durch Bettmaterial.
- Gestufte Luftzufuhr möglich.

c) Entschwefelung der Abgase

Zur Entschwefelung der Abgase wird in der Regel Kalkstein eingesetzt. Je nach Prozessführung unterscheidet man zwischen trockenem und nassem Verfahren. Beim nassen Verfahren fällt Gips ($CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$) an, der nach der Abscheidung aus dem Waschwasser als Rückstand deponiert oder als Rohstoff in der Bauindustrie eingesetzt wird (REA-Gips).

Reaktionsschema vereinfacht: $Ca(OH)_2 + SO_2 + 0.5\ O_2 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$

Bezeichungen von Kalk:

Kalk = Calciumcarbonat $CaCO_3$

$\downarrow$ 900°C

gebrannter Kalk = Calciumoxid CaO (+ CO_2)

$\downarrow$ H_2O, $-\Delta h$

gelöschter Kalk = Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$

$\downarrow$ + SO_2 + 0.5 O_2

Gips (Selenit) = Calciumhydrogensulfat $CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$

7 Feuerungsanlagen

7.1 Öl- und Gasfeuerungen

Die Verbrennung von Erdöl ist in der Schweiz die wichtigste Technik zur Erzeugung von Raumwärme und Prozessenergie. Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe werden einerseits Produkte einer unvollständigen Verbrennung emittiert (CO, Russ, HC). Da Öl und Gas jedoch vergleichsweise homogene und genau dosierbare Brennstoffe sind, kann in heutigen Anlagen in der Regel ein guter Ausbrand erzielt werden. Die Konzentrationen von unverbrannten Schadstoffen sind deshalb – bis auf die Anfahrphasen – gering. Von grösserer Bedeutung sind die Emissionen an SO_2 sowie an Stickoxiden.

Schwefelemissionen

Zur Verminderung der Belastung an SO_2, welches unter anderem an der Bildung von sauren Niederschlägen mitbeteiligt ist, wurde der Schwefelgehalt der Brennstoffe in den letzten Jahren mehrfach gesenkt auf heute 0.20 Gew.-% für Heizöl EL und 190 mg/kg für Erdgas (LRV).
Durch die Verbrennungstechnik kann lediglich das Verhältnis von SO_3/SO_2 beeinflusst werden und dies nur schwach. In der Regel liegen etwa 1-3 % als SO_3 vor.
Als mögliche Sekundärmassnahme zur Verminderung der SO_2-Emissionen wird manchmal die Abgaskondensation betrachtet. Da SO_2 nur schwach wasserlöslich ist, beträgt die SO_x-Abscheidung jedoch lediglich ca. 0.5 – 4 % und ist damit praktisch wirkungslos. Von sehr hoher Wirksamkeit (Abscheidegrad von über 90% möglich) ist dagegen die Abscheidung in Nasswäschern, welche mit einer basischen Lösung arbeiten (z.B. Natronlauge, Calciumhydroxid).

Emissionen an CO, HC, Russ und NO_x

Im Mittelpunkt der aktuellen Anstrengungen zur Schadstoffminderung stehen die *Stickoxidemissionen*. Bei konventionellen Ölfeuerungen werden in der heissen Kernzone der Flamme hohe Konzentrationen an thermischen Stickoxiden gebildet. Erst bei heutigen Low-NOx-Feuerungen spielen auch die Brennstoffstickoxide eine massgebliche Rolle (Anteil von ca. 20-30% oder evtl. höher).
Massnahmen zur Minderung der *unverbrannten Schadstoffe CO, HC und Russ* führen in den meisten Fällen zu einer Erhöhung der Stickoxide. In den letzten Jahren hat sich das Entwicklungsziel in Richtung einer Optimierung wie folgt verlagert:
Früheres Ziel: Maximaler Ausbrand. Bei Motoren: maximale Leistung bzw. Verdichtung
Heutiges Ziel: Geringe Emissionen an Unverbrannten *und* geringe NOx-Emissionen.

Massnahmen zur Schadstoffminderung bei der Verbrennung von Öl und Gas:

Massnahme	Primäre Wirkung	Sekundäre Wirkung (Schadstoffe)
Brenner		
- Vermischung Öl/Luft; evtl. mit Gebläse	Vermischung verbessern	CO, HC, Russ (gelbe Flamme mit Russ)
- Vormischung (Gas) oder Vorverdampfung (Öl)	Vermischung verbessern Temperaturspitzen verhindern lokaler O_2-Gehalt senken	**NO_x** (thermisch) und CO, HC, Russ (blaue Flamme ohne Russ)
Flamme		
- Flächenbrenner	Temperaturspitzen verhindern	**NO_x** (thermisch)
- Flammenkühlung (Strahlung)	Temperaturspitzen verhindern	**NO_x** (thermisch)
Prozess		
- Lange Brennerlaufzeit	Anfahremissionen verhindern	CO, HC, Russ
- Feuerraumbelastung klein	Temperatur senken	**NO_x** (thermisch)
- Luftstufung	Temperaturspitzen verhindern lokaler O_2-Gehalt senken 1. Bildung von thermischen NOx vermindern 2. Reduktion von Stickstoff ($NO + NH_2 = N_2 + ...$) fördern	**NO_x** (thermisch <u>und</u> Brennstoff-NOx)
- Abgasrezirkulation in-/extern	Temperatur senken lokaler O_2-Gehalt senken	**NO_x** (thermisch)

Seit das Heizoel in den 50er Jahren zum dominierenden Brennstoff und Energieträger in der Gebäudeheizung geworden ist, wurden hauptsächlich Oelzerstäubungsbrenner eingesetzt. Dabei erfolgt die Zerstäubung des Oels in feinste Tröpfchen mittels einer Düse bei einem Oeldruck von 7 bis 14 bar. Gleichzeitig wird dem Heizoel die für die Verbrennung notwendige Luftmenge durch das im Brenner eingebaute Gebläse zugeführt. Das Brennstoff-Luftgemisch wird durch einen elektrischen Hochspannungsfunken gezündet, der Verbrennungsvorgang wird durch selbsttätig wirkende Sicherheitsorgane überwacht.

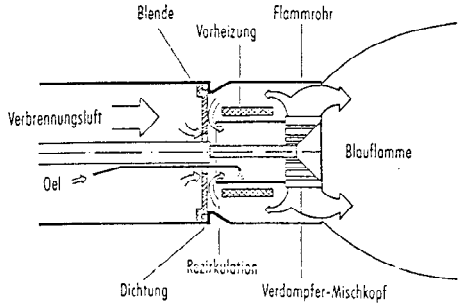
Als wesentliche Voraussetzung für eine gute Verbrennung muss der Oelzerstäubungsbrenner eine intensive Mischung des Oelnebels mit der Verbrennungsluft bewirken. Einbauten als Misch- und Flammenhalteinrichtungen im Brennerrohr unterstützen dies. Das Heizoel verbrennt bei dieser Art Brenner in der typischen, gelb leuchtenden Flamme.

Quelle: Info-Stelle Heizoel

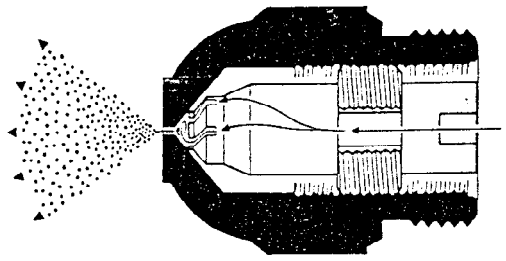
Für industrielle Feuerungen, wo neben Heizoel EL auch Mittel- und Schweroele verbrannt werden, werden neben der Druckzerstäubung auch Oeldruck-Dampfdruck-Zerstäubungsbrenner, Luftdruckzerstäubungs- oder Drehzerstäuberbauarten verwendet.

Schon länger bekannt sind Druckluftzerstäuber- und Injektionsbrenner für kleinere Leistungen. Deren Vorteil ist die relative Unempfindlichkeit auf Verstopfungen an den Düsen. Als einziger «Nachteil» gegenüber der direkten Oeldruckzerstäubung wurde bei der Druckluftzerstäubung bis heute die Notwendigkeit eines zusätzlichen Luftkompressors herausgestellt, mit entsprechenden Zusatzkosten.

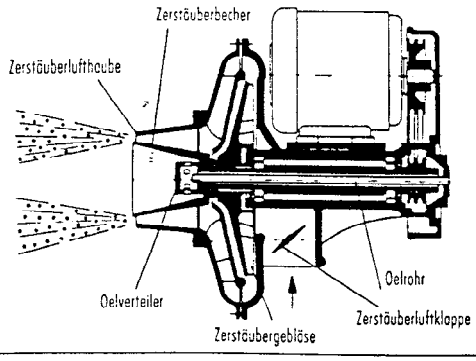
System Blue-Fan (Füllemann)



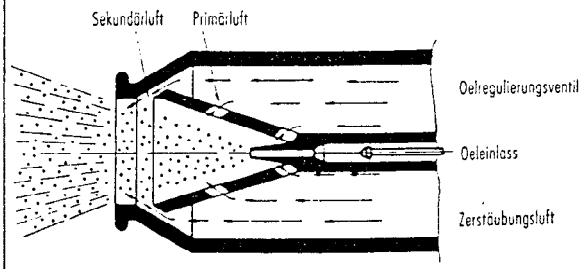
Druckzerstäuberdüse



Prinzip einer Drehzerstäubung



Prinzip der Luftdruckzerstäubung



Drastisch verschärfte Emissionsgrenzwerte von Feuerungsschadstoffen, höchste Energieausbeute, wechselnde Oelqualitäten und niedrigere Leistungen von Gebäudeheizungen, insbesondere beim Einfamilienhaus, zwingen die Oelbrennerkonstrukteure zu vollständig neuen Oelbrennerbauarten. Dabei erinnert man sich der grundlegenden Mechanismen eines Feuerungsablaufes ergänzt mit neuesten Erkenntnissen der NO_x-Bildungsmechanismen in heissen Flammenzonen.

Ein Pflichenheft neuer Oelbrennerbauarten kann etwa wie folgt dargestellt werden:

- Optimales Emissionsverhalten für Russ, CO (Kohlenmonoxid), Stickoxid (NO_x) und Kohlenwasserstoffe
- Unempfindlichkeit auf wechselnde Oelqualitäten
- Hoher verbrennungstechnischer Wirkungsgrad mit Regelfähigkeit bis zu Kleinleistungen von 6 bis 15 kW
- Verbrennungstechnische Langzeit-Betriebsbeständigkeit mit einfachem Aufbau.

Vergasen muss, was brennen soll

Jeder Brennstoff, ob flüssig oder fest, brennt erst, wenn er durch Hitzeeinwirkung verdampft und in die Gasphase überführt worden ist. Dies gilt für Kohle, Holz, Papier oder Heizoel. Der Schlüssel zur einwandfreien, schadstoffarmen und vollständigen Verbrennung führt über die entsprechende Steuerung der Vorgänge vor oder in der Flamme. Die bisherigen Oelbrennerbauarten nach Zerstäuberprinzip mit der gelben Flamme bilden das Oel/Luftgemisch, die Verdampfung des Heizoels und dessen Ausbrand in einem Zonenbereich.

In bezug auf Emissionswerte und Wirkungsgrad bringt diese Bauart nicht die Werte, die in Zukunft gefordert sind.

Durch bewusstes Entkoppeln des Verbrennungsprozesses in zwei Teilabläufe, der Durchmischung des Brennstoffes mit Verbrennungsluft und dessen Verdampfung/Vergasung und der getrennten Verbrennung des Luft/Gasgemisches wurde eine neue Brennertechnologie eingeleitet. Äusserlich erkennbar ist ein solcher Verbrennungsablauf an der hellblauen Flamme, die sich im weiteren Ausbrand in Violett verfärbt.

Eine solche Verbrennung bringt massive Verbesserungen bezüglich Russ- und CO-Bildung und damit des Wirkungsgrades.

Erkenntnisse über die komplexe Bildung von Stickoxiden (NO_x) führten die Konstrukteure zu einem weiteren, wichtigen Schritt, der sogenannten internen Rauchgasrückführung und damit zur Kühlung der Flamme, wodurch die NO_x-Bildung (bei Oel- und Gasbrennern) massiv gesenkt werden konnte.

Unterschiedliche Wege zum Ziel

Nicht zuletzt in Erwartung der kommenden, verschärften Schadstoffbegrenzungen für Feuerungen hat die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Oelbrennerfabrikanten zu neuen Konstruktionen geführt, die jetzt (1989) die Marktreife erhalten. Dabei haben unterschiedliche Konstruktionen für Gebäudeheizungen die Praxiserprobung durchlaufen. Derzeit können vier Bauarten unterschieden werden, die jedoch alle auf denselben theoretischen Überlegungen der modernen Oelfeuerungstechnik basieren. Und alle brennen blau.

Seit längerer Zeit bereits bekannt ist der sogenannte «Raketenbrenner» (nach MAN), der aber (noch) keine grosse Verbreitung gefunden hat.

Eine andere Herstellerin (Systherm) hat seit einigen Jahren mit dem Einsatz von Druckluft zur ultrafeinen Oelzerstäubung einen schadstoffarmen, blau brennenden Oelbrenner in kleineren Stückzahlen auf den Markt gebracht.

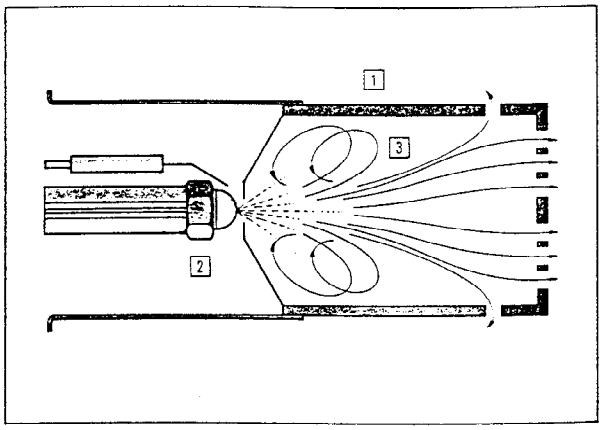
Gänzlich neu entwickelt (und mit dem Umweltschutzpreis der EG ausgezeichnet) wurde ein Oelverdampfungsbrenner nach Prinzip Füllemann (Blue-Fan), der erstmals konsequent die Bedürfnisse der schadstofffreien Verbrennung bei sicherer Beherrschung kleinster Brennerleistungen zu erfüllen vermochte. Gekennzeichnet durch eine rotierende Verdampfer-/Mischkopfeinheit wird der Verbrennungsvorgang in drei Phasen entkoppelt:

- Brennstoffverdampfung im Heissgasstrom und an der Oberfläche eines rotierenden Zylinders, auf dem das Oel drucklos aufgebracht wird.
- Gemischaufbereitung im Inneren des Mischkopfes mit Verbrennungsluftstrahl, Brennstoffdampf.
- Verbrennung am Austritt des Mischkopfes als stabile, blaue, weit gefächerte entspannte Flamme.

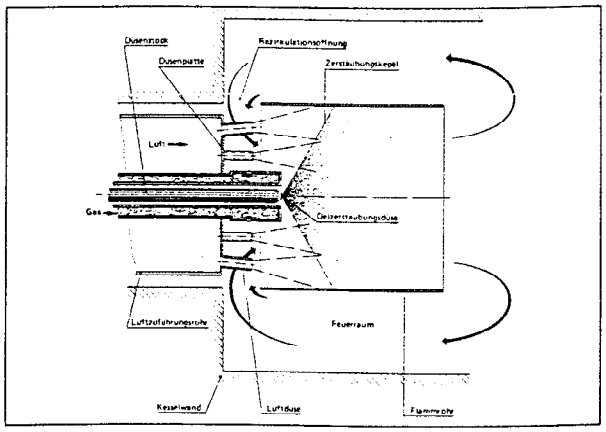
Kombustorbrennkopf und hohe Schule der Aerodynamik

Durch geschickte Kombination der Druckluftzerstäubung und der kontrollierten Verbrennung auf engstem Raum innerhalb eines sogenannten Kombusterbrennkopfes gelang es ELCO, einen Oelbrenner zu konstruieren, der in hohem Masse – kesselunabhängig – niedrigste Schadstoffwerte und hohen Wirkungsgrad garantiert. Durch ausgeklügelte Führung der Verbrennungsluft, des Oelnebels und der rückgeführten, heissen Rauchgase entsteht eine intensive, blau brennende Oelflamme innerhalb und knapp ausserhalb des Kombustorkopfes.

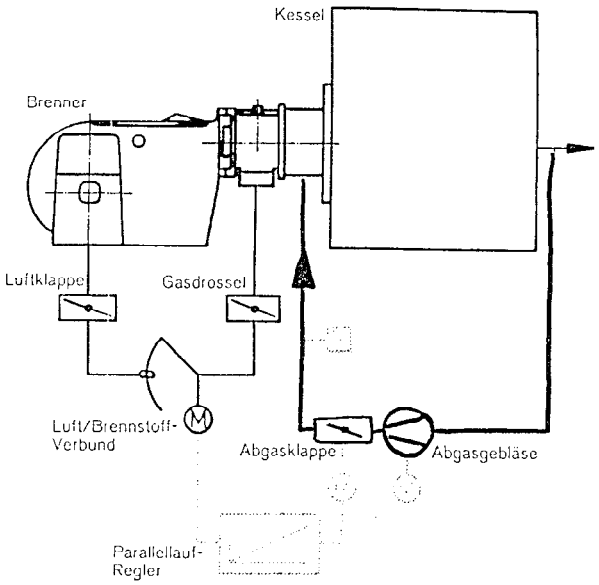
Unter dem Begriff Oeconox bietet Oertli einen blau brennenden Oelbrenner für kleine und mittlere Leistungen an, dessen Konstruktionsprinzip auf der raffinierten Ausnützung der Strömungsmechanik von Verbrennungsluft, heisser Rezirkulationsgase und der weit, regenschirmartig gefächerten Oelverdüsung beruht. Durch entsprechende Konstruktion von Oeldrolldüse, Luftstrahlpumpe und Luftdüsen gelang es auch hier, den Brennstoff Heizoel durch Ausnutzung der Eigenwärme rasch zur Vergasung und anschliessenden blauen Verbrennung zu bringen.

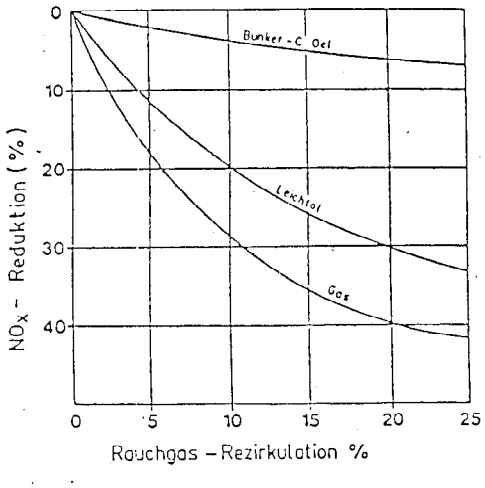


LOW-NO_x-Brenner mit Rezirkulation innerhalb des Brennerkopfes (1). Nach der Düse (2) werden die Oeltröpfchen durch interne Heissgas-Rezirkulation vollständig gasförmig (3) (Werkbild Elco).



LOW-NO_x-Brenner mit interner Abgas-Rezirkulation für Anlagen bis 1 MW Leistung (Werkbild Oertli).



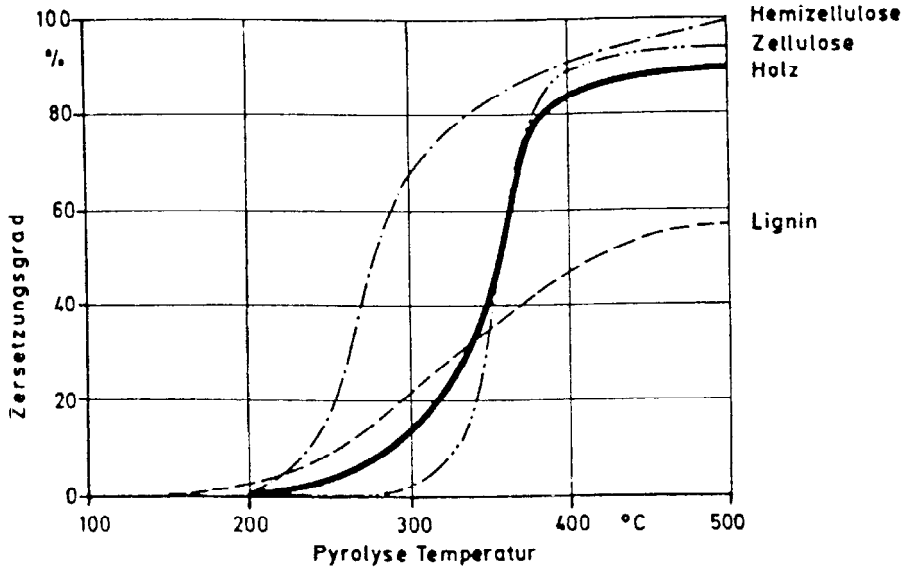


Typischer Einfluss der Abgasrückführung auf die Stickoxidbildung (Oertli SE low NO_x-Brenner)

7.2 Holzfeuerungen

Vertiefte Informationen zur Holzenergie werden in der Vorlesung „Technische Energienutzung von Biomasse“ vermittelt. Im vorliegenden Kapitel werden die wichtigsten Anwendungen kurz beschrieben. Holz ist chemisch gespeicherte Sonnenergie, indem der Baum in hochspezialisierten Zellen CO_2 aus der Atmosphäre zu hochwertigen organischen Substanzen synthetisiert (Zellulose, Lignin und Hemizellulose). Bei der Verbrennung – also der Umkehrung der Photosynthese – kann die von der Sonne gespeicherte Energie wieder gewonnen werden.
Holz ist als erneuerbarer Energieträger eine sinnvolle Energiequelle, sofern die Emissionen bei der Nutzung auf ein Minimum vermindert werden. Der Anteil der Holzenergie am Gesamtenergieverbrach beträgt in der Schweiz gut 2%. Aus Sicht der Waldwirtschaft ist eine vermehrte Verwendung von Holz als Rohstoff und Energieträger erwünscht. Die Bedeutung des Energieholzes könnte – unter Beachtung des Gebots der Nachhaltigkeit – rund verdoppelt bis verdreifacht werden.
Nebst naturbelassenem Holz fällt heute vermehrt auch Restholz aus Industrie und Gewerbe sowie Altholz aus den Bereichen Bau und Möbel an. Letzteres ist zu einem eigentlichen Entsorgungsproblem geworden, da wegen der Verunreinigungen ähnlich strenge Anforderungen erfüllt werden müssen wie bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen.

Verbrennungsvorgang und Schadstoffbildung. Bei der Erwärmung auf Temperaturen über 300˚C wird Holz zersetzt in gasförmige Komponenten und festen Kohlenstoff. Bei 500˚C liegen 85 Gew.-% der Holzsubstanz als gasförmige Verbindungen vor.

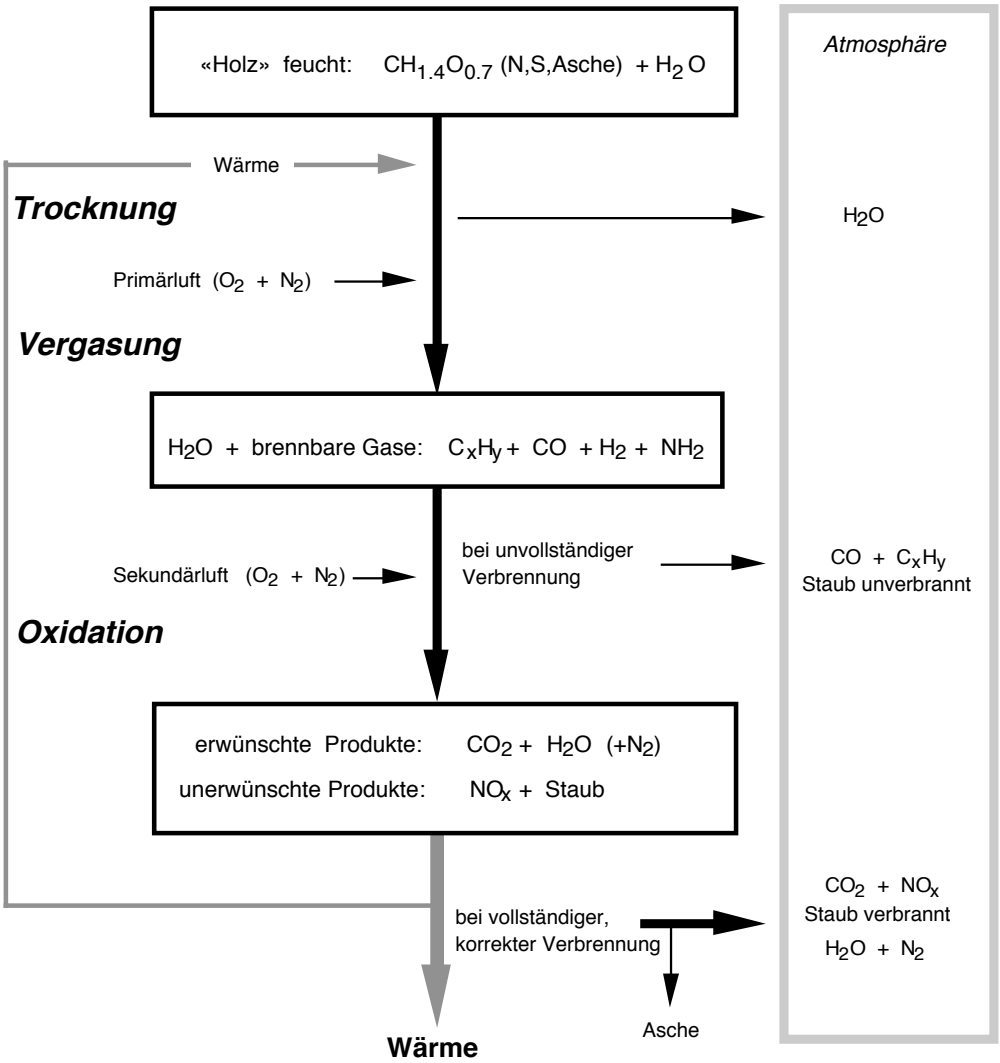


Thermische Zersetzung von Holz und seinen Bestandteilen Zellulose, Hemizellulose und Lignin in Funktion der Temperatur [Hellwig 1988]

Bei der Erwärmung von Holz in einer Feuerung wird das Holz mit dem Wasser der Holzfeuchtigkeit und der von aussen zugeführten Verbrennungsluft vergast zu Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H_2)

und zahlreichen Kohlenwasserstoffverbindungen (CH_4 usw.; im folgenden zusammengefasst als HC). Die Verbrennung von Holz setzt sich somit zusammen aus folgenden Teilprozessen:

- Trocknung
- Zersetzung von Holz zu Gasen und Kohlenstoff (Pyrolyse) } heterogene Reaktionen
- Umsetzung des Kohlenstoffs zu Gasen (CO)
- Oxidation der Gase } homogene Reaktionen



Aufgrund der Teilprozesse Vergasung und Oxidation lassen sich die Schadstoffe wie folgt einteilen:

1. *Emissionen aus unvollständiger Verbrennung*

   - Kohlenmonoxid CO
   - Kohlenwasserstoffe HC
   - unverbrannte Partikel

   Diese Schadstoffe können durch eine vollständige Verbrennung vermieden werden. Der Auswurf an Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Staubemissionen ist sehr stark von der Verbrennungsführung abhängig. Eine gute Holzfeuerung kann deshalb einen vielfach geringeren Auswurf an diesen Schadstoffen aufweisen als eine einfache Feuerung.

2. *Emissionen aus vollständiger Verbrennung*

   - Kohlendioxid CO_2
   - Stickoxide NO_X
   - Aschepartikel

   Da diese Schadstoffe auch bei einer vollständigen Verbrennung auftreten, können sie nicht (Asche, CO_2) bzw. nur bedingt (NO_X) vermieden werden. Falls die Asche im Feuerungssystem abgeschieden wird, ist sie nicht als Luftschadstoff von Bedeutung. Da die Stickoxidemissionen bei Holzfeuerungen vorwiegend dem Holzstickstoff entstammen, können sie nur bedingt beeinflusst werden.

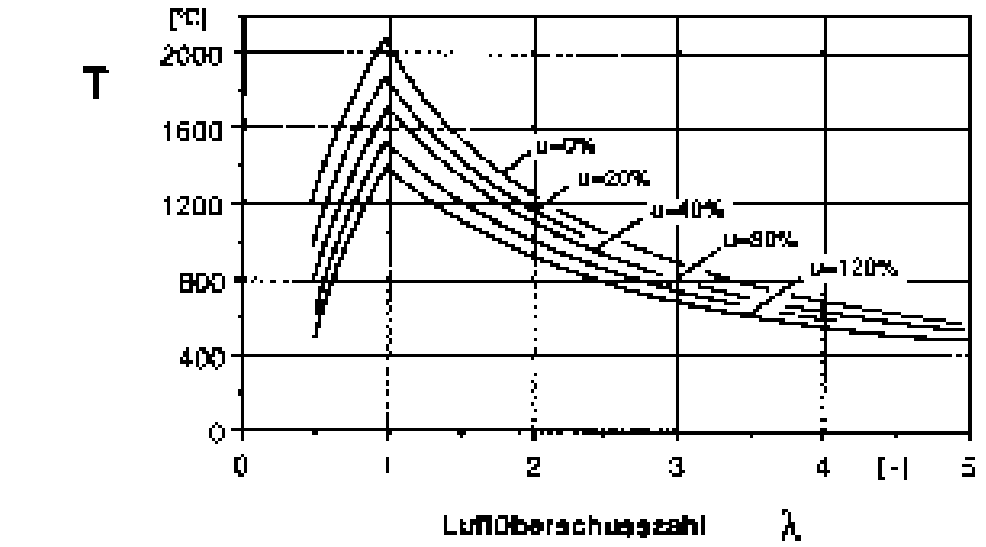
Voraussetzungen für eine vollständige Verbrennung. Die wichtigsten Voraussetzungen für eine vollständige Verbrennung von Holz sind: hohe Temperatur, ausreichende Aufenthaltszeit in der heissen Zone und gute Vermischung der Verbrennungsluft mit dem Holz und den aus dem Holz freigesetzten brennbaren Gasen: T T T (time, temperature and turbulence).

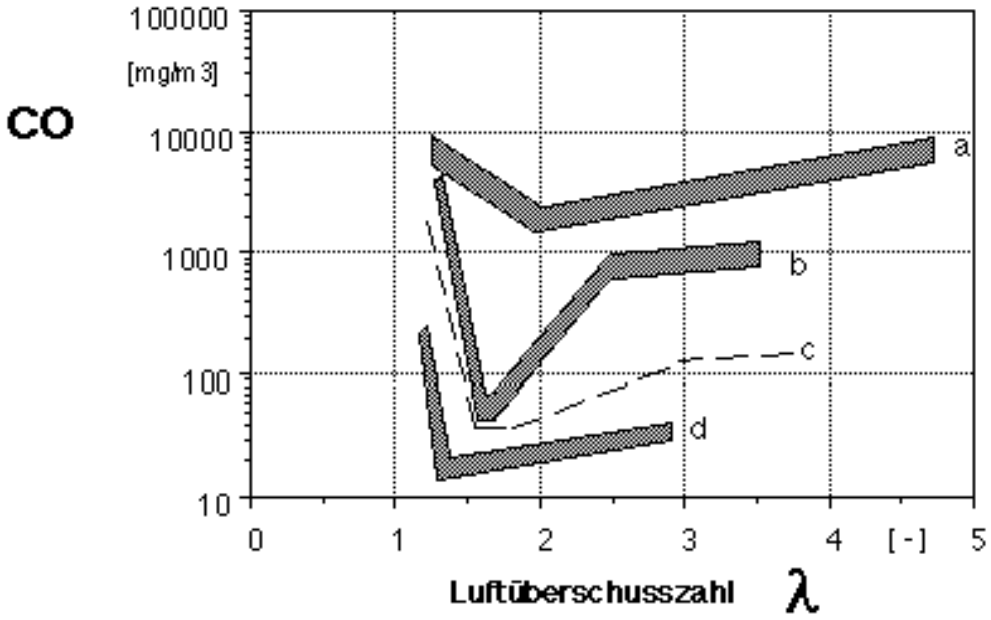
- *Zeit:* Stofftransport, Stoffaustausch und Reaktion.
- *Temperatur und Luftüberschuss:* Zur Gewährleistung einer hohen Reaktionstemperatur (ca. 800˚ bis 1000˚C) darf die Flamme nicht direkt gekühlt werden. Im weiteren muss die Verbrennung bei kleinem Luftüberschuss ($\lambda \approx 1.5$) durchgeführt werden, da die Flammentemperatur – insbesondere bei der Verbrennung von feuchtem Holz – bei grossem Luftüberschuss nicht genügend hoch ist.
- *Vermischung (Turbulenz):* Damit die bei der Vergasung freigesetzten Stoffe mit dem Luftsauerstoff reagieren können, müssen sie möglichst homogen mit der Verbrennungsluft vermischt werden. Die Viskosität von Gasen steigt mit zunehmender Temperatur stark an, was die Vermischung der brennbaren Gase mit der Sekundärluft erschwert.

Luftüberschuss und CO/Lambda-Diagramm. Der Luftüberschuss ist eine wichtige Betriebsgrösse, die sowohl die Emissionen als auch den Wirkungsgrad einer Feuerungsanlage entscheidend beeinflusst. Für eine vollständige Verbrennung muss der Luftüberschuss grösser als 1 sein, da sonst örtlich nicht genügend Sauerstoff für den Ausbrand der Gase zur Verfügung steht. Ist der Luftüberschuss dagegen zu gross (grösser als 2 bis 3), so wird die Flamme durch die unnötig zugeführte Luft gekühlt, so dass die Verbrennung infolge zu niedriger Temperatur ebenfalls unvollständig wird.
Da die Vermischung zwischen Brenngasen und Luft bei Festbrennstoffen schwieriger zu kontrollieren ist als bei flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, werden Biomassefeuerungen in der Regel bei höherem Luftüberschuss betrieben als Öl- und Gasfeuerungen. Typisch sind Werte zwischen 1,5 und 2,5 für Biomasse sowie zwischen 1,05 und 1,5 für Öl und Gas.
Der Luftüberschuss bestimmt nebst der Menge an Oxidationsmittel im Feuerraum auch die Verbrennungstemperatur. Eine Feuerung mit guter Vermischung von Luft und Gasen ist ein Betrieb bei niedrigem Luftüberschuss und niedrigem CO-Gehalt möglich, während schlechte Feuerungen einen hohen Luftüberschuss benötigen. Da sich Kohlenwasserstoffe und weitere unvollständig ausgebrannte Produkte ähnlich verhalten wie Kohlenmonoxid wird CO oft als Indikator der Ausbrandqualität verwendet. Das Verbrennungsverhalten von Feuerungsanlagen kann deshalb auch anschaulich beschrieben werden durch die Darstellung im CO/Lambda-Diagramm [Nussbaumer 1989]. Am Beispiel eines Stückholzkessels (Kurve b) können darin drei verschiedene Bereiche wie folgt unterschieden werden:

1. Ein Bereich mit unvollständiger Verbrennung bei grossem Luftüberschuss und tiefer Verbrennungstemperatur, im Beispiel b) bei $\lambda > 2.5$.
2. Der Bereich $1.5 < \lambda < 2.5$: Mit sinkendem Luftüberschuss steigt die Verbrennungstemperatur, da Luft und Gase noch ausreichend vermischt werden wird die Verbrennungsqualität deutlich besser.

3. Der Bereich $\lambda < 1.5$: Mit weiter sinkendem Luftüberschuss treten Zonen mit lokalem Sauerstoffmangel auf, die Verbrennungsqualität wird deshalb drastisch schlechter.
   Bis zu einer Luftüberschusszahl von 1 steigt die theoretische Verbrennungstemperatur weiter an. Die in einer realen Anlage erzielte Temperatur steigt ebenfalls weiter an, jedoch wegen der unvollständigen Verbrennung weniger stark als die gezeigte adiabate Temperatur. Der starke Anstieg der Kohlenmonoxidkonzentration ist in diesem Bereich nicht die Folge unzureichender Temperaturen (und damit zu langsam ablaufender chemischer Reaktionen), sondern vielmehr eine Folge der unzureichenden Vermischung von Verbrennungsluft und brennbaren Gasen.





Oben: Adiabate Verbrennungstemperatur in Funktion der Luftüberschusszahl für Holzfeuchtigkeiten von 0%, 20%, 40%, 80% und120% atro.

Unten: Kohlenmonoxidemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl (CO/Lambda-Diagramm) für verschiedene Feuerungstechniken.

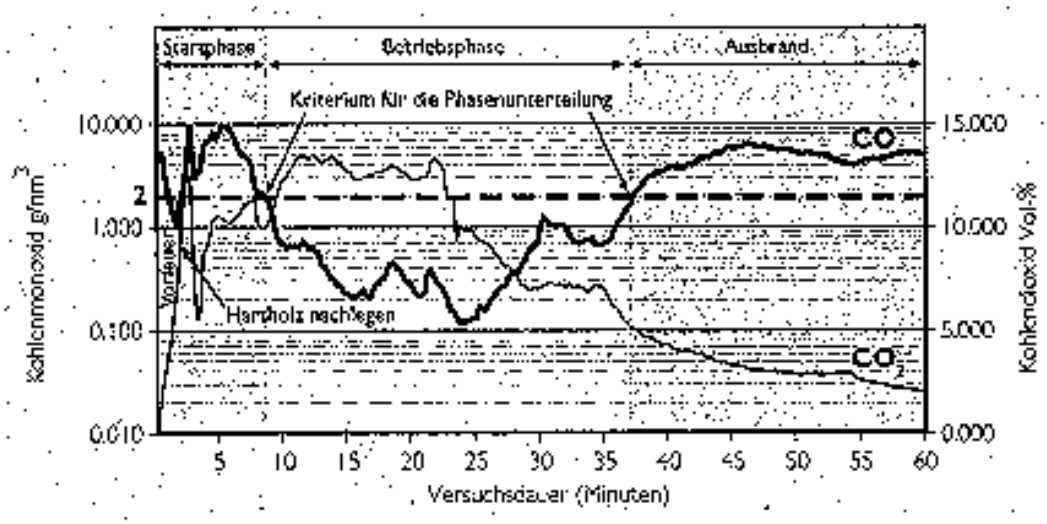
a) Einfache handbeschickte Holzfeuerung

b) Stückholzkessel mit unterem Abbrand.

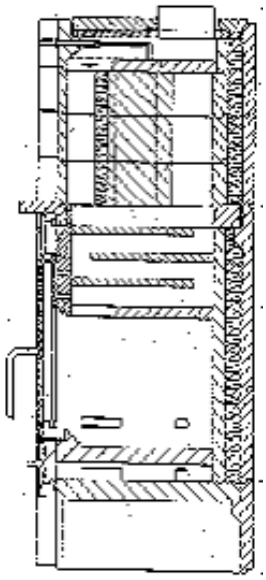
c) Automatische Holzfeuerung mit Verbrennungstechnik Stand 1990

d) Automatische Holzfeuerung mit optimierter Verbrennungstechnik (ab 1995)

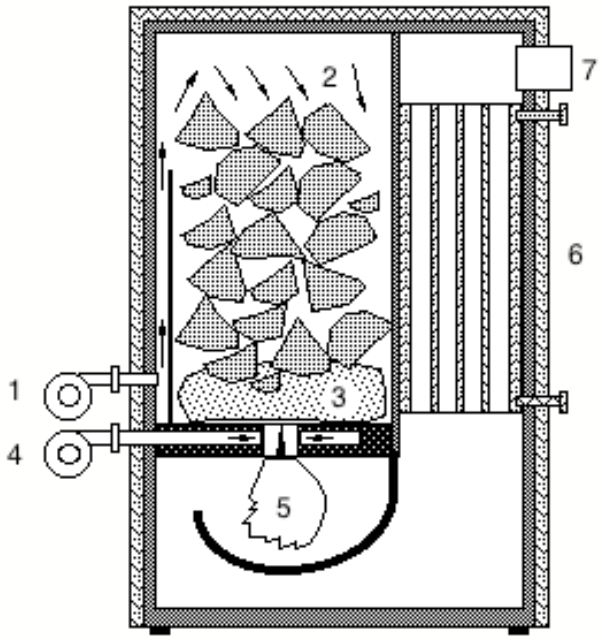
Handbeschickte Holzfeuerungen: Bei handbeschickten Holzfeuerungen umfasst der Verbrennungsablauf einen chargenweisen Abbrand mit dem Anfeuern, der stationären Verbrennungsphase und dem Ausbrand der Holzkohle. Dies führt zu einer Diskontinuität im Verbrennungsablauf, so dass eine optimale Einhaltung des Brennstoff-/Luftverhältnisses schwierig ist. Dennoch können handbeschickte Feuerungen emissionsarm betrieben werden. Voraussetzung dazu ist jedoch nebst einer guten Feuerung eine korrekte Betriebsweise und insbesondere die Verwendung von geeignetem Brennstoff. Dies ist in der Regel ausschliesslich naturbelassenes Holz in Form von Scheitholz oder aus naturbelassenem Holz ohne Zusätze hergestellte Presslinge.



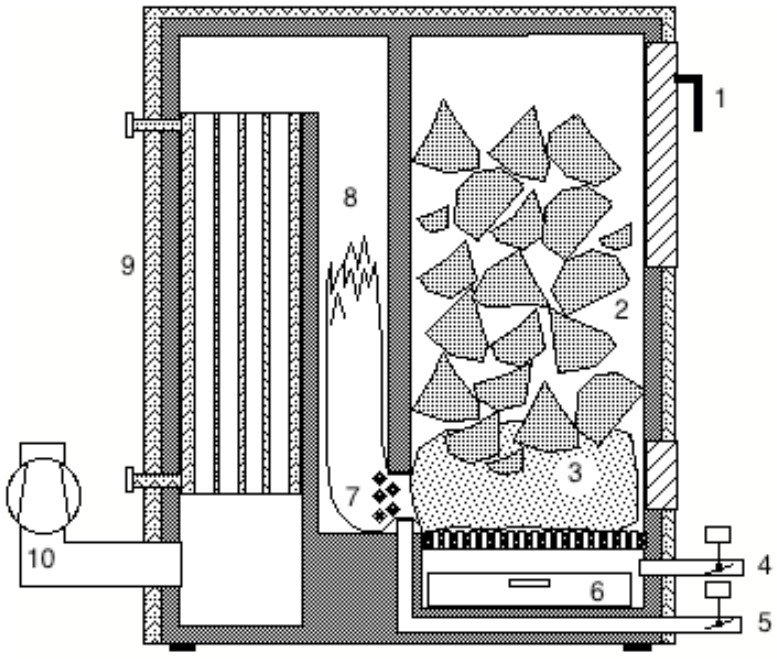
Typischer Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidverlauf bei einer Durchbrandfeuerung mit Start-, Betriebs- und Ausbrandphase.



Zimmerofen mit oberem Abbrand, heisser Ausbrandzone oberhalb des Brennraums und nachgeschalteter Wärmeübertragung auf Speichersteine (Attika Feuer AG).

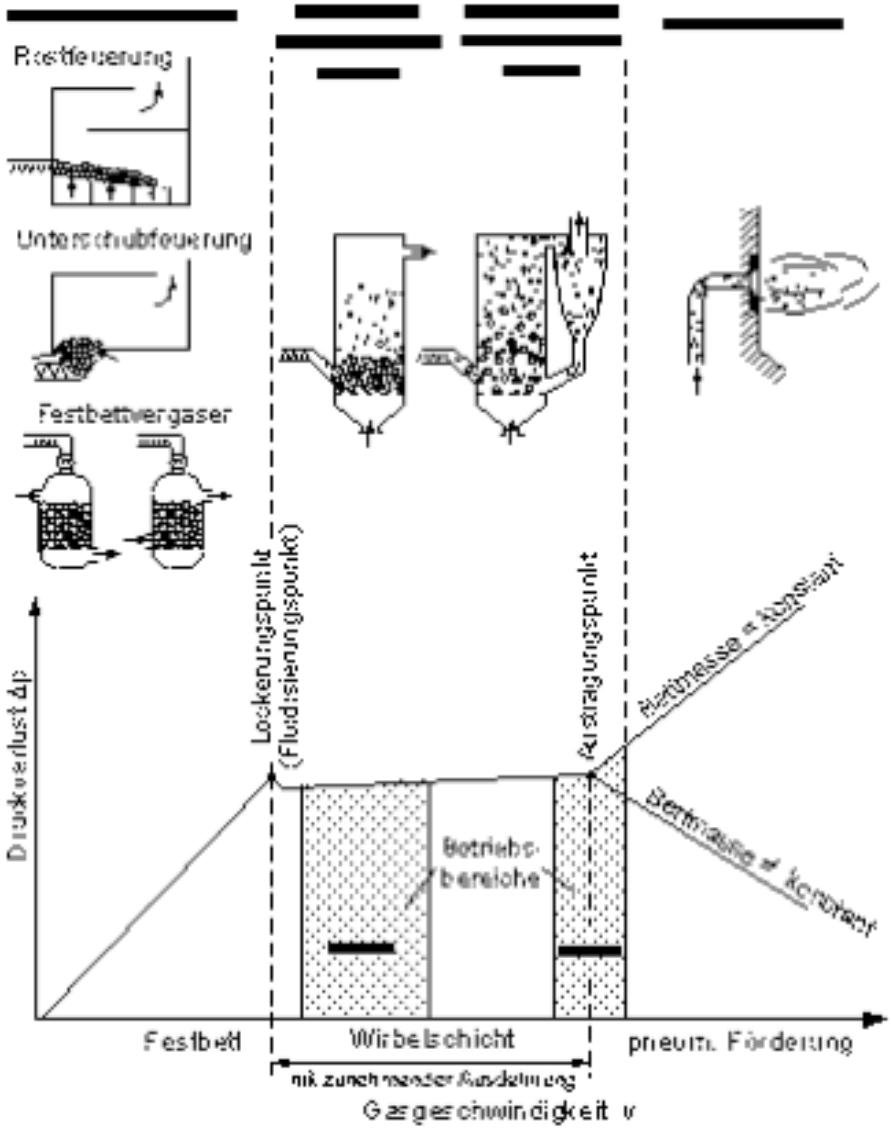


Sturzbrandkessel. 1 Primärluftzufuhr, 2 Füllschacht, 3 Glutbett mit Vergasungszone, 4 Sekundärluftzufuhr, 5 Nachbrennkammer, 6 Wärmeübertrager, 7 Abgas.



Stückholzkessel mit seitlichem unterem Abbrand (Schmid AG). 1 Fülltüre, 2 Füllschacht, 3 Glutbett mit Vergasungszone, 4 Primärluftzufuhr, 5 Sekundärluftzufuhr, 7 Turbulenzeinrichtung, 8 Nachbrennkammer, 9 Wärmeübertrager, 10 Abgasventilator.

Automatische Holzfeuerungen. Feuerungsanlagen können aufgrund der Relativgeschwindigkeit zwischen Brennstoffpartikeln und Luft unterteilt werden in Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromreaktoren. Bei geringer Anströmgeschwindigkeit wird das Brennstoff von der Verbrennungsluft durchströmt, ohne dass das Brennstoffbett dadurch wesentlich aufgelockert wird. Dieser Zustand stellt sich in einer Unterschub- oder Rostfeuerung ein und wird als Festbett bezeichnet.

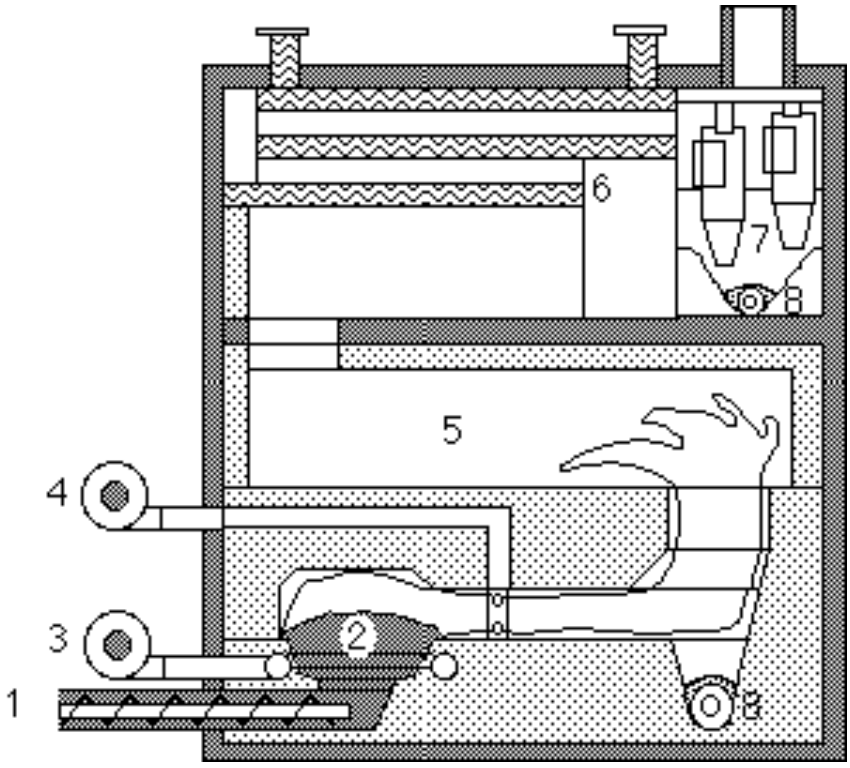


Einteilung der Feuerungssysteme mit zunehmender Gasgeschwindigkeit: Festbett, stationäre Wirbelschicht, zirkulierende Wirbelschicht und Flugstromreaktor (Staubfeuerung).

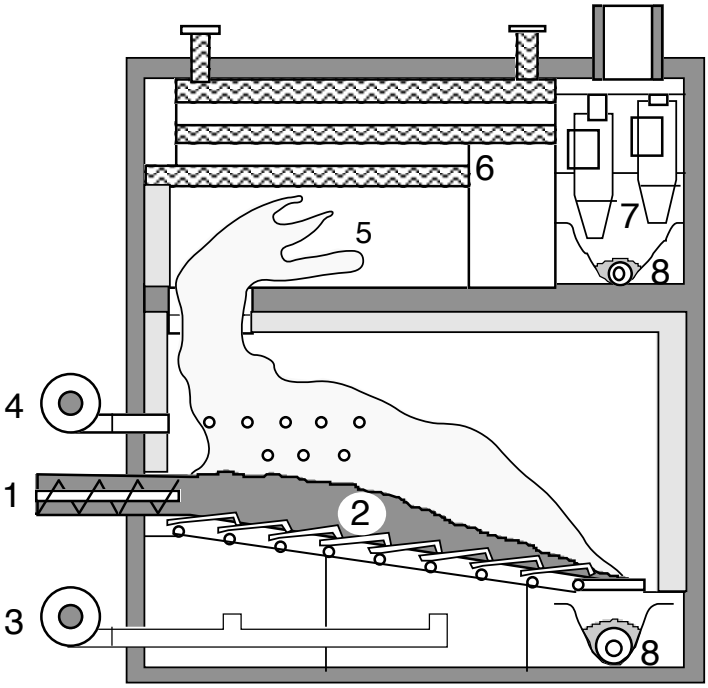
Bei Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit werden die Brennstoffpartikel aufgelockert und angehoben, bis sie im Fall der stationären Wirbelschicht einem Schwebezustand gehalten werden. Bei weiterer Erhöhung der Gasgeschwindigkeit erfolgt ein partieller Austrag von Bettmaterial, so dass eine Abscheidung und Rückführung der ausgetragenen Partikel erforderlich ist. Ein solches System wird

als zirkulierende Wirbelschicht bezeichnet. Als Besonderheit dieser Technik ist zu erwähnen, dass in der Regel nicht nur Brennstoff im Festbett vorhanden ist, sondern der Hauptteil des Bettmaterials aus einem Inertstoff besteht, welcher nicht an der Verbrennung teilnimmt. Als Inertmaterial wird in der Regel Quarzsand eingesetzt, wobei bei aschereichen Brennstoffen auch die im Prozess angereicherte Asche als Bettmaterial dient. Das Inertmaterial bietet einerseits die Möglichkeit, dass durch die Wärmekapazität eine Temperaturstabilisierung erzielt wird. Im weiteren kann bei besonderen Anwendungen auch ein katalytisch wirksames Inertmaterial eingesetzt werden (was zum Beispiel bei der Vergasung zum Einsatz kommt). Sofern die Abscheidung von Schwefel erforderlich ist, kann zudem eine Schwefeleinbindung durch Kalkzugabe in den Prozess im Reaktor selbst stattfinden, so dass auf eine nachgeschaltete Entschwefelung verzichtet werden kann. Dies wird zum Beispiel bei der Kohleverbrenung eingesetzt.

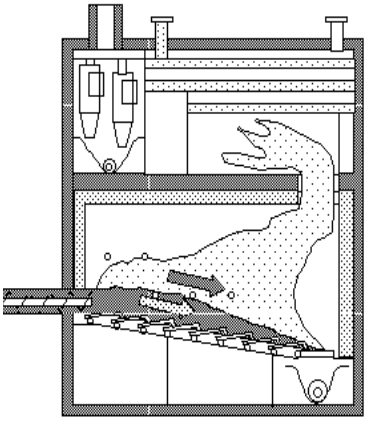
Wenn sämtliche Partikel mit dem Gasstrom mitgerissen werden und die Feststoffpartikel mit dem Gas transportiert werden, findet die Umsetzung im Flugstrom statt, was im Fall der Verbrennung in einer Staubfeuerung realisiert wird.



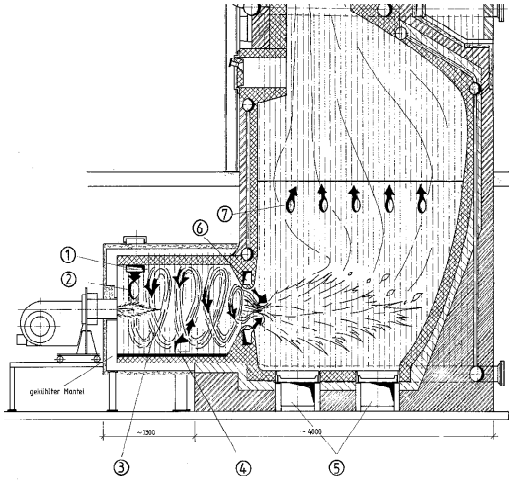
Unterschubfeuerung. 1 Brennstoffzuführung, 2 Verbrennungsretorte, 3 Primärluft, 4 Sekundärluft, 5 Brennkammer, 6 Wärmeübertrager, 7 Zyklon, 8 Aschenaustragung.



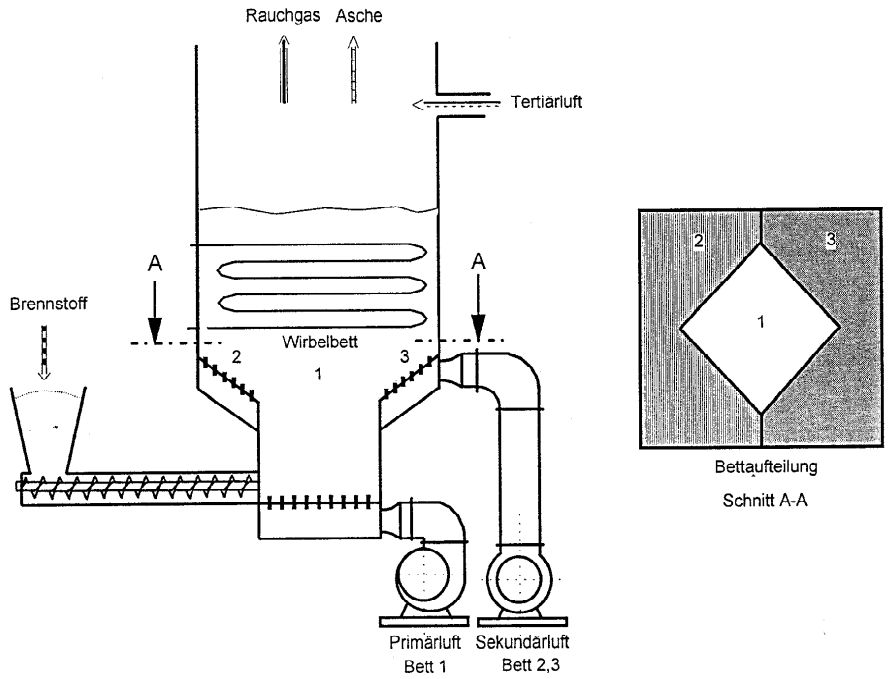
Vorschubrostfeuerung nach dem Gegenstromprinzip, geeignet für nasse Brennstoffe. Varianten: Planrost, Treppenrost, Wanderrost, Walzenrost. 1 Brennstoffzuführung, 2 Rost, 3Primärluft, 4Sekundärluft, 5 Brennkammer, 6 Wärmeübertrager, 7 Zyklon, 8 Aschenaustragung



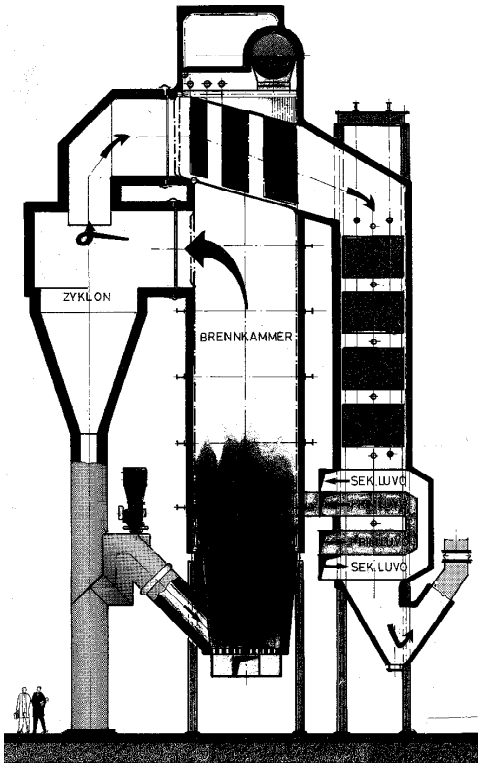
Gleichstromprinzip, geeignet für geringe und mittlere Feuchtigkeitsgehalte



Muffeleinblasfeuerung [Seeger 1989]. 1 Primärluft, 2 Spänezufuhr, 3 Vergasung und partielle Verbrennung, 4 Abgaszufuhr, 5 Entaschung, 6 Tertiärluftzufuhr



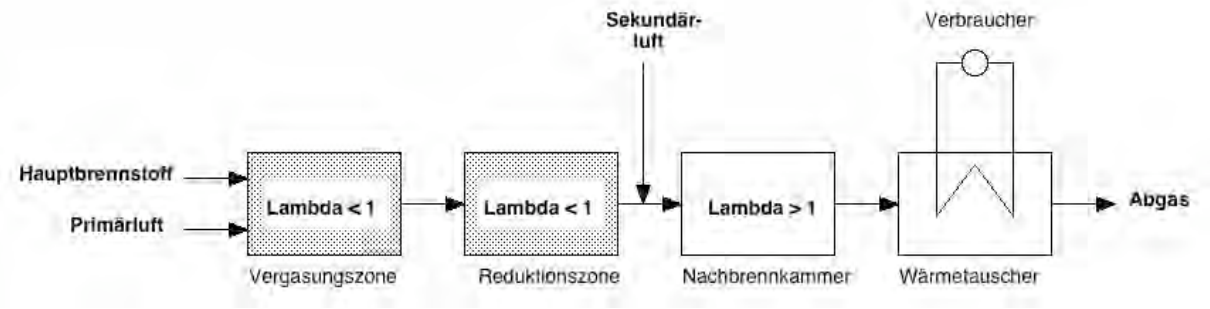
Stationäre Wirbelschichtfeuerung mit Luftzufuhr in drei Zonen für optimierten Teillastbetrieb.



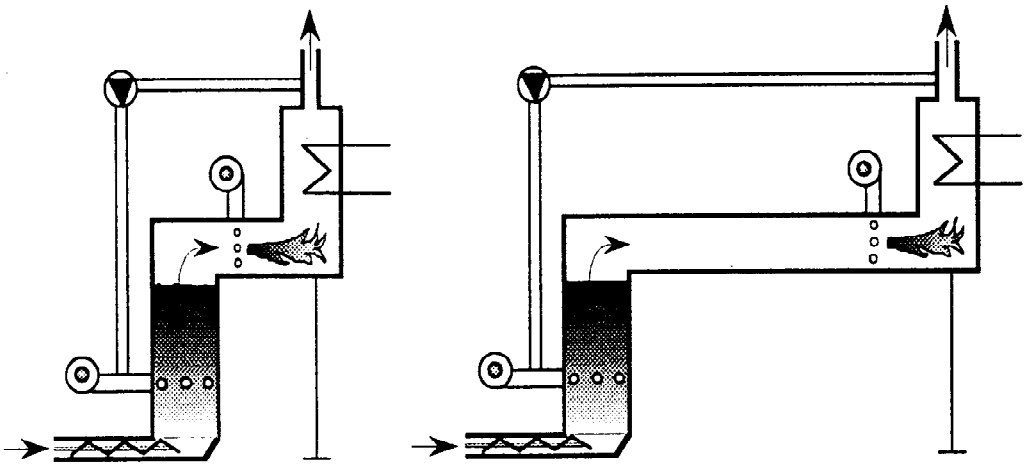
Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung mit Dampfkessel (Ahlstrom Pyroflow).

Stickoxideminderung durch Luftstufung. Die Stickoxide bei der Holzverbrennung stammen unter den heute üblichen Bedingungen vorwiegend aus dem Holzstickstoff. Thermische Stickoxide aus dem

Luftstickstoff sind nur von untergeordneter Bedeutung. Eine gezielte Beeinflussung der Stickoxidemissionen ist bis heute praktisch nicht möglich. Da die Werte höher liegen als bei Öl und Gas, sollten zukünftige Entwicklungen auch eine Verminderung der Stickoxide zum Ziel haben. Für die Behandlung der entsprechenden Massnahmen der gestuften Verbrennungsführung wird auf das Kapitel Stickoxide verwiesen.

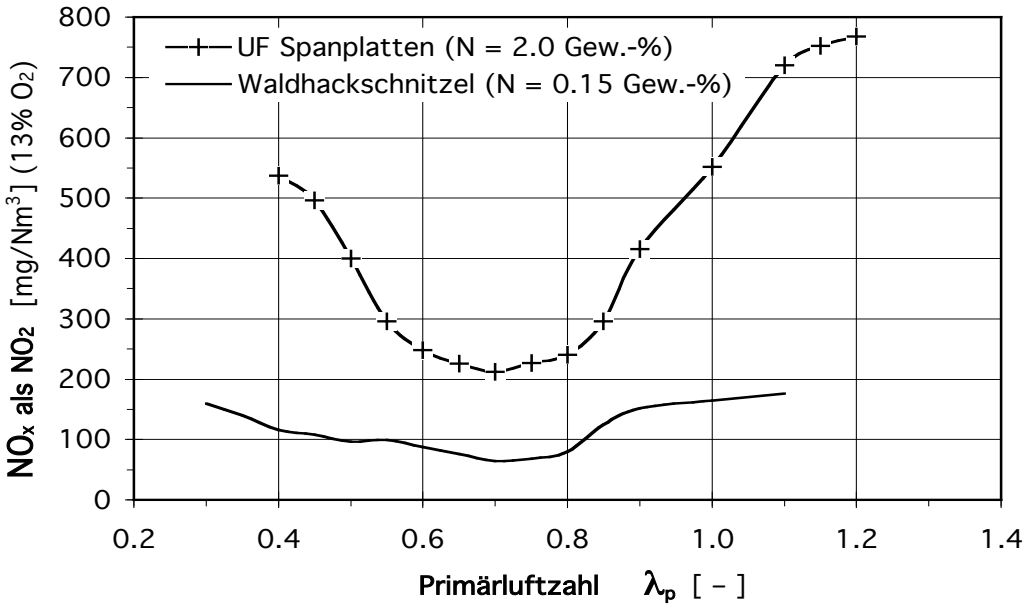


Prinzip der Luftstufung.



Anwendung der Luftstufung mit Reduktionskammer (schematisch). Links: Konventionelle zweistufige Verbrennung. Rechts: Zweistufige Verbrennung mit Reduktionskammer zur NO_x-Minderung.

Die Möglichkeiten der Luftstufung unter Variation von Verweilzeit, Temperatur und Stöchiometrie in der Reduktionszone wurden an der ETH in einer Laboranlage untersucht und in der Zwischenzeit bei verschiedenen automatischen Feuerungsanlagen eingesetzt. Die Untersuchungen zeigen, dass unter idealen Bedingungen eine NO_x-Minderung von rund 50% bei niedrigem Stickstoffgehalt (naturbelassenes Holz) sowie um 75% bei erhöhtem Stickstoffgehalt (z.B. UF-Spanplatten) möglich ist. Daneben zeigen die Messungen auch, dass durch Luftstufung ohne Reduktionskammer, d.h. Einhalten unterstöchiometrischer Bedingungen in der Primärzone, immerhin eine NO_x-Minderung um rund die Hälfte der angegenen Werte erreicht werden kann.



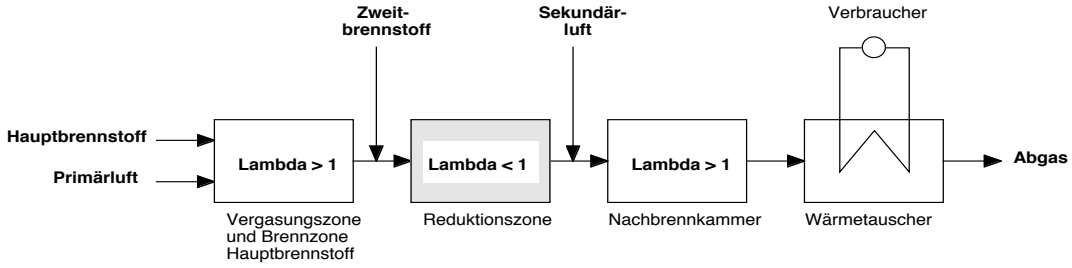
NO_X-Emissionen in Funktion der Primärluftzahl für die Verbrennung von UF-Spanplatten und naturbelassenem Holz in einer Laboranlage mit Luftstufung. Temperatur in der Reduktionszone: 1'160°C, Verweilzeit: 0.3 – 0.6 s.

Zur Erreichung minimaler NO_X-Werte durch Luftstufung mit Reduktionskammer in der Versuchsanlage ist die Einhaltung folgender Bedingungen bezüglich Temperatur, Verweilzeit und Primärluftzahl in der Reduktionszone erforderlich:

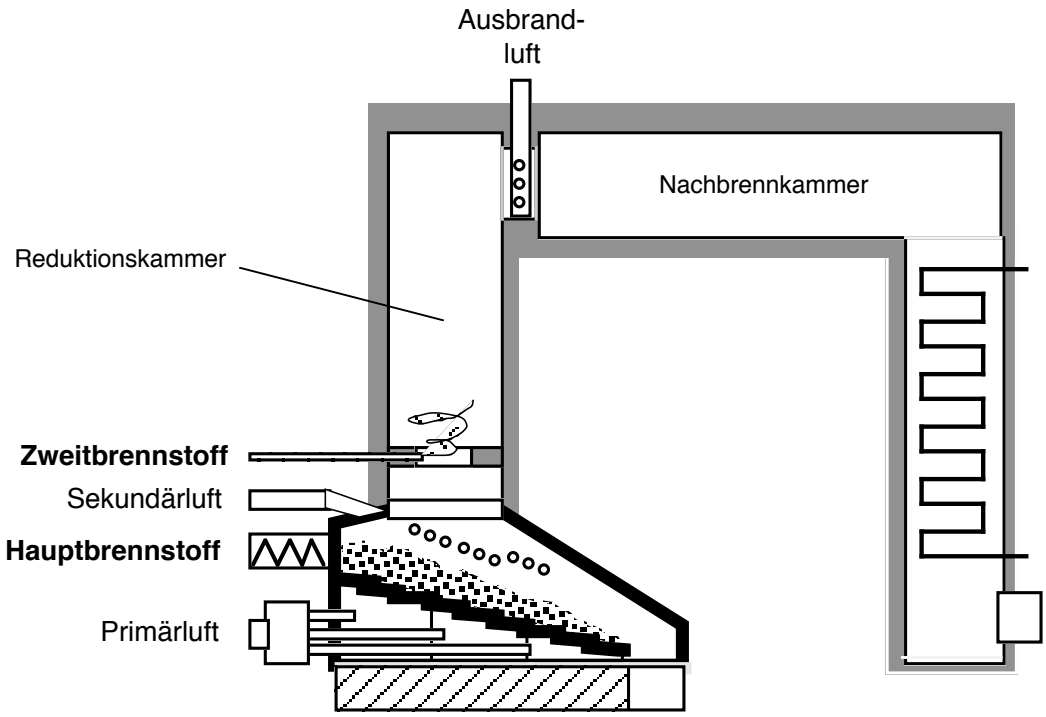
- Verweilzeit um 0.5 s (> 0.3 s) und gute Vermischung der Gase (Turbulenz)
- Temperatur in der Reduktinszone zwischen 1'100C° und 1'200C°
- Primärluftzahl zwischen 0.7 und 0.8.

Insbesondere die Primärluftzahl hat einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der NO_X-Reduktion. Bei einer Primärluftzahl < 0.7 ist in der Reduktionszone kaum NO verfügbar. Die NH-Verbindungen werden deshalb in der Nachbrennkammer zu NO oxidiert. Bei einer Primärluftzahl > 1 werden die stickstoffhaltigen Zwischenprodukte bereits in der Vergasungszone weitgehend zu NO oxidiert, so dass in der Reduktionszone keine NH-Verbindungen für den NO-Abbau mehr zur Verfügung stehen. Die erzielbaren NO_X-Werte mit Luftstufung sind in im Vergleich zur konventionellen Verbrennung angegeben.

Stickoxideminderung durch Brennstoffstufung. Mit Brennstoffstufung kann ein ähnliches Minderungspotential erreicht werden wie mit Luftstufung, allerdings bereits bei tieferen Temperaturen. Für den Zweitbrennstoff ist eine feine Aufmahlung erforderlich zur Erzielung einer hohen NO_X-Minderung. Da zwei unabhängige Brennstoffzuführungen notwendig sind, eignet sich Brennstoffstufung in erster Linie für grössere Anlagen.



Prinzip der Brennstoffstufung.



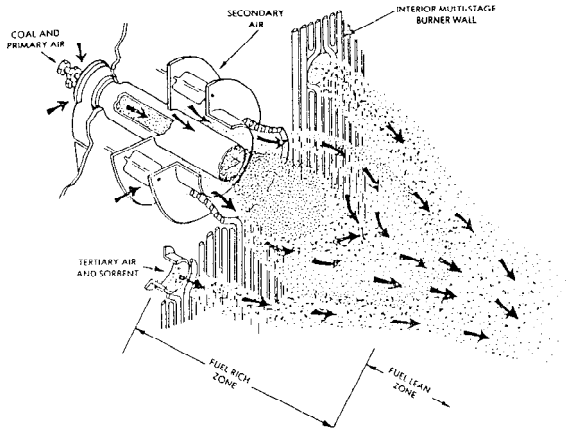
Anlagenkonzept zur Brennstoffstufung, Leistungsbereich ab ca. 10 MW.

7.3 Kohleverbrennung

Kohle ist in der Schweiz vor allem im industriellen Bereich von Bedeutung. Wie alle fossilen Brennstoffe ist Kohle das Produkt der Inkohlung von organischer Materie, bei welcher der C-Anteil unter Sauerstoffabschluss über Jahrmillionen angereichert wird, indem gleichzeitig H-reichere Komponenten (z.B. Methan, Erdgas) die Grundsubstanz verlassen. Je nach Fortschritt dieses Prozesses unterscheidet man mit zunehmendem Inkohlungsgrad:

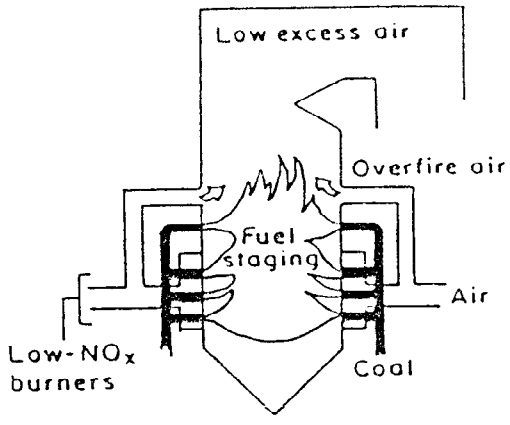
Holz	50% C
Torf	60% C
Braunkohle	70% C
Steinkohle	85% C
Anthrazit	95% C

Bei der Verbrennung von Kohle treten die für Festbrennstoffe typischen Probleme auf wie aufwendiges Feststoff-Handling, Vermischung, Ascheabscheidung. Zusätzlich weist Kohle in der Regel einen hohen Gehalt an Schwefel und Stickstoff auf, so dass – ohne Massnahmen – entsprechend hohe Emissionen an SOx und NOx resultieren. Weltweit wird Kohle in grossen Mengen in Kraftwerken zur Stromerzeugung eingesetzt. Zur Verbrennung werden vor allem verschiedene Bauarten von Kesseln mit Staubbrennern sowie in geringerem Mass auch Wirbelschichtfeuerungen eingesetzt. Zur Abscheidung der SOx-Emissionen wird in der Regel Kalk eingedüst, das sich mit SO_2 zu Gips verbindet, welcher im Bauwesen verwertet werden kann. Zur Erzielung geringer NOx-Emissionen ist bei konventioneller Verbrennungstechnik die Anwendung von Sekundärmassnahmen notwendig (SNCR und SCR-Verfahren). Bei Kohlestaubfeuerungen kann die NOx-Bildung durch eine gestufte Verbrennung reduziert werden (Luftstufung oder Brennstoffstufung). Als wirkungsvollere Primärmassnahme zur Verminderung der NOx-Emissionen eignet sich die Verbrennung in der Zirkulierenden Wirbelschicht (ZWS), die aufgrund der homogenen Vermischung im Bett und der Zugabe von Inertmaterial eine Brennstoffumsetzung bei niedriger Temperatur (ca. 850°C) und geringer Bildung von thermischen Stickoxiden ermöglicht. Gleichzeitig führen die Reaktionen der gestuften Verbrennung wie der Abbau an C, in der ZWS zu einer Verminderung von Brennstoffstickoxiden.



Schematic of low-NO_x/SO_x pulverized coal burner..

Kohlestaubbrenner mit Luftstufung (Beér 1990).



Kohlestaubfeuerung mit Brennstoffstufung (Beér 1990).

8 Anhang

8.1 Einheiten und Brennstoffdaten

	kJ	kcal	kWh	kg SKE	Barrel	m^3 Erdgas
kJ	1	0,2388	0,000278	0,000034	1,76 10^{-7}	0,000032
kcal	4,1868					
kWh	3 600					
kg SKE	29 308					
Barrel	5 694 050					
m^3 Erdgas	31 736					

Alte Einheiten im Englisch-sprachigen Raum:

Energy: gigajoule (GJ) = 0.9488 MMBtu
kilowatt-hour (kWh) = 3,414.7 Btu
Mass: kilogram (kg) = 2.20462 pounds
metric tonne (T) = 1 Mg = 1.10231 ton
Power: kilowatt (kW) = 1.341 hp
Pressure: kilopascals (kPa) = 0.145 pounds per square inch
Temperature: °C = (°F - 32)/1.8
Volume: cubic meter (m3) = 264.17 gallons

		kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	m³ Erdgas
Kilojoule (kJ)	1	1	0.2388	0.000278	0.000034	0.000024	0.000032
Kilokalorie (kcal)	1	4.1868	1	0.001163	0.000143	0.0001	0.00013
Kilowattstunde (kWh)	1	3600	860	1	0.123	0.086	0.113
kg Steinkohleeinh. (SKE)	1	29308	7	8.14	1	0.7	0.923
kg Rohöleinheit (RÖE)	1	41868	10000	11.63	1.428	1	1.319
m³ Erdgas	1	31736	7580	8.816	1.083	0.758	1

Einheitenrechner von www.ier.uni-stuttgart.de/links/ufaktor.html

Druckeinheiten: 1 bar = 10^5 Pa, 1 Pa = 1 N/m^2

Heizwert und Zusammensetzung einiger Brennstoffe (Richtwerte). TS = Trockensubstanz.

Brennstoff	**Heizwert**	Aschegehalt	C	H	O	N	S
	MJ/KgTS	%	%	%	%	%	%
Steinkohle	**27–32**	3–17	65–80			1.5–2.0	0.5–1.5
Braunkohle	14–23	9–33	47–64	3.5–5.8	12–25	1–4	4.8–8.8
Heizöl	**42**	0.01–0.06	85	11–13	<1	0.2–0.7	0.5–1.0
CH: LRV							< 0.2
Typisch						0.008 – 0.14	0.14
Chinaschilf	16 – 18	2 – 5	45–49	5.5–6.4	40–44	0.5–1.5	0.05–0.3
Stroh	17– 18	1 – 4	44	6	46	1	0.01
Holz	**18,3** (18– 19)	0.5 – 2	45–50	5.6–6.5	44	0.1–0.5	0.01–0.5

8.2 Vorsätze und Vorzeichen

z	Zepto	10^{-21}	Quadrillionstel
a	Atto	10^{-18}	Trillionstel
f	Femto	10^{-15}	Billiardstel
p	Piko	10^{-12}	Billionstel
n	**Nano**	**10^{-9}**	**Milliardstel**
µ	**Mikro**	**10^{-6}**	**Millionstel**
m	**Milli**	**10^{-3}**	**Tausendstel**
c	Zenti	10^{-2}	Hundertstel
d	Dezi	10^{-1}	Zehntel
da	Deka	10^{1}	Zehn
h	Hekto	10^{2}	Hundert
k	**Kilo**	**10^{3}**	**Tausend**
M	**Mega**	**10^{6}**	**Million**
G	**Giga**	**10^{9}**	**Milliarde**
T	**Tera**	**10^{12}**	**Billion**
P	**Peta**	**10^{15}**	**Billiarde**
E	**Exa**	**10^{18}**	**Trillion**

8.3 Literatur

Einführende Literatur zum Thema Energie
Einführende Literatur zum Thema Energie

Baehr, H. D.: *Thermodynamik*, Springer-Verlag Berlin u.a., ISBN 3-540-18073-7 6. Auflage

Diekmann, B.; Heinloth, K.: *Energie*, 2. Auflage, Teubner-Verlag Stuttgart 1997, ISBN 3519130572

Heinloth, K.: *Energie*, Teubner-Verlag Stuttgart 1983, ISBN 3-519-03057-8

Heinloth, K.: *Energie und Umwelt*, Teubner-Verlag Stuttgart 1996, ISBN 3519136570

Kugeler, K; Phlippen, P.: *Energietechnik*, Springer1990 und Springer 1992 (2. Auflage)

Strauss, K.: *Kraftwerkstechnik*, Springer 1992, ISBN 3-540-54950-1

Suter, P.; Vogel, A.: *Energieversorgung I*, Vorlesung ETH Zürich 1987

Literatur zur Situation Umwelt und Emissionen in der Schweiz

BUWAL: *Umwelt in der Schweiz 1997*, Bern 1997 and www.admin.ch/buwal, Bern 2001

BUWAL: *Schwebestaub, Messung und gesundheitliche Bewertung*. Schriftenreihe Umwelt 270, Bern 1996

BUWAL: *Modellierung der PM10-Belastung in der Schweiz*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 310, Bern 1999

BUWAL, B. Jordi: Feinstaub in der Atemluft schleicht sich heimlich ins Blut, *Umwelt*, Nr. 2 2000, Bern 2000, 12–14

BUWAL: *Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 256, Luft, Bern 1995

BUWAL: *Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 255, Luft, Bern 1995

BUWAL, Kessler F., Knechtle, N, Frischknecht R.: *Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bern 2000

Jansen U.: Bedeutung der Partikel- und Stickoxid-Emissionen aus Holzfeuerungen und Massnahmen zur Luftreinhaltung. *6. Holzenergie-Symposium*, 20.10.00, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 69 – 90

Nussbaumer, Th. (Ed.): *Aerosols from Biomass Combustion*, International Seminar, June 27 2001 in Zurich, Verenum press, Zurich 2001, ISBN 3-908705-00-2

Nussbaumer, Th.: Relevance of aerosols for the air quality in Switzerland. *Aerosols from Biomass Combustion, International Seminar*, 27 June 2001, ETH Zürich, June 27 2001 in Zurich, Verenum press, Zurich 2001, ISBN 3-908705-00-2, 1–10

Energie im Gebäude

Reinmuth, F.: *Energieeinsparung in der Gebäudetechnik*, Vogel-Verlag Würzburg 1994, ISBN3-8023-1502-2

Ergänzende Literatur und zitierte Quellen

Baltensperger, U.: *Chemische und morphologische Charakterisierung von partikelförmigen Luftfremdstoffen*, Diss Universität Zürich 1985

Bansal, N.; Gürzenich, D.; Mathur, J.; Wagner, H.-J.: *Material and Energie Demand for selected renewable Energie technologies*, Project INI-305-96 by DLR and BMBF, Indian Institute of Technology New Delhi (India), and Universitit of Essen (Germany), 1998

Beér, J.: Advanced combustion methods for low grade coal utilization, in: Korhonen (Ed.), *Low-grade fuels, Vol. 1, VTT Symposium 108*, Espoo (SF) 1990, 83-112

Bilitewsky; Härdtle; Marek: Grundlagen der Pyrolyse von Reststoffen, in: Thomé-Kozmiensky, K. (Ed.), *Pyrolyse von Abfällen*, EF-Verlag, Berlin 1985,1-77

Bohl, W.: *Strömungsmaschinen*, 2. Aufl., Vogel, Würzburg 1982

Bundesamt für Konjunkturfragen/RAVEL: *Elektrizität im Wärmesektor*, Bern 1991

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: *Vom Menschen verursachte Schadstoffemissionen in der Schweiz*, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 76, Bern 1987

Christen, H.R.: *Allgemeine Chemie*, Sauerländer, Aarau 1977

Dietzel, F.: *Technische Wärmelehre*, 3. Aufl., Vogel, Würzburg 1984

Ebersberger, R.; Mauch, W.: Der kumulierte Energieaufwand von Glühlampen und Kompaktleuchtstofflampen, *Brennstoff Wärme Kraft* BWK 43 (1992) 3, 109–114

Eidg. Institut für Reaktorforschung: *Blockheizkraftwerke und Total-Energieanlagen*, Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft Nr. 35, Bern 1984

Ferreira, J.; Nussbaumer, Th.: *Modellierung von Verbrennungsprozessen*, BEW, Bern 1997

Folsom, B.; Bartok, W.: Gas reburning-sorbent injection for simultaneous NOX and SOX control, *Energy Technol. XVI; Conf. 1989*, Wash., DC. – Rockville: Gl (1989), 513-527 0-86587-429-8

Fricke, J.; Borst, W.: *Energie, Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen*, R. OldenburgVerlag München1984, ISBN 3-486-24972-X

Frischknecht, R.: *Ökologische Bewertung von Systemen der solaren Wassererwärmung und Stromerzeugung sowie der Wärme-Kraftkopplung*, Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich 1994

Frischknecht, R.; Hofstetter, P.: *Rückzahldauer bei vorzeitigem Ersatz*, Arbeitspapier 6, Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt, Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich 1993

Frischknecht, R.; Hofstetter, P.; Knoepfel, I.; Dones, R.; Zollinger, E.: *Ökoinventare für Energiesysteme*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1994

Frischknecht, R.; Hofstetter, P.; Knoepfel, I.; Dones, R.; Zollinger, E.: *Environmental Life-Cycle Inventories of Energie Systems*. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Paul Scherrer Institute (PSI) Villigen, Swiss Federal Office of Energie, Berne, Zürich and Villigen 1994

Fritz, W.; Kern, H.: *Reinigung von Abgasen*, Vogel, 2. Auflage, Würzburg 1990, ISBN 3-8023-0244-3

Gerber, B: Jede Energietechnik reizt das Klima, *Tages Anzeiger*, 24. März 1994, Seite 100. Eine Zusammenstellung der Forschungsergebnisse der Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt der ETH Zürich (siehe Frischknecht et al. 1994)

Grassman, P.; Widmer, F.: *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*, 2. Auflage, de Gruyter, Berlin 1974

Grohe, H.: *Otto- und Dieselmotoren*, Vogel-Verlag, 6. Auflage, Würzburg 1982, ISBN 3-8023-0052-1

Günther, R.: *Verbrennung und Feuerungen*, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg 1974, ISBN 0-387-06422-2

Haltiner, E.: CO_2 heizt das Klima an, *Haus Tech* 1990

Hartmann, H. und Kaltschmitt, M. (Eds.): *Biomasse als erneuerbarer Energieträger*, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 3, Landwirtschafts-Verlag Münster (D), 2002

Hasberg, W.: Drehrohrofen und Nachbrennkammer als chemischer Reaktor zur Rückstandsverbrennung, *WLB Wasser, Luft und Boden* 11-12 1989, Special 25 Jahre Drehrohrofen, 18-24

Hellwig, M.: *Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe*, Diss TU München, MEG-Bericht 145, Weihenstephan 1988, ISSN-Nr. 0931-6264

Infel: *Die kleine Energiebroschüre*, Energie für Menschen, Erneuerbare Energien, Umwelt und Energie: Informationsbroschüren der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft, Verlag INFEL Zürich 1992

Jungbluth, N., Frischknecht, R., Faist, M.: *Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz*. Bundesamt für Energie, Bern/Uster, 2002

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: *Energie aus Biomasse*. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer 2001, ISBN 3-540-64853-4

Kasser, U.; Pöll, M.; Graffe, K.: *Ökologische Bewertung mit Hilfe der grauen Energie*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2001

Kessler, F.; Knechtle, N.; Frischknecht, R.: *Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000

Kleemann, M.; Meliss, M.: *Regenerative Energiequellen*, Springer 1988, ISBN 3-540-18097-4

Köbel, M.: Die Entstehung von Luftschadstoffen in Feuerungen und mögliche Gegenmassnahmen, *Heizung Klima* Nr. 9 1989, 67-73

Kolar, J.: *Stickstoffoxide und Luftreinhaltung*, Springer 1990, ISBN 3-540-50935-6

Leuckel, W.; Römer, R.: Schadstoffe aus Verbrennungsprozessen, *VDI-Bericht* Nr. 346 (1979)

Levenspiel, O.: *Chemical Reactor Engineering*, John Wiley and Sons, New York/London 1962

Lurgi: Firmenunterlagen Abgasreinigung 1991

Menig, H.: Emissionsminderung und Recycling, 2. Auflage, Ecomed Verlag 1987

Nussbaumer, Th.: Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk – Konzept, Potenzial und Wirtschaftlichkeit für Deutschland, Brennstoff Wärme Kraft BWK, Mai 2006

Nussbaumer, Th.: Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk – Konzept, Potenzial und Wirtschaftlichkeit, Gas Wasser Abwasser GWA, 5 2006, 395–401

Nussbaumer, Th.: Holzenergie ja, aber wie: für Wärme, Strom oder Treibstoff, HK Gebäudetechnik, 3 2006, 30–36

Nussbaumer, Th.: Holzfeinstaub und Dieselruss: Gleiche Korngrösse mit teilweise ganz unterschiedlicher Wirkung, HP Das Fachmagazin für Hafner und Plattenleger, Nr. 2 2006*, 14–19*

Nussbaumer, T.; Oser, M.: *Evaluation of Energy Systems based on Biomass Combustion by Cumulative Energy Demand*, International Energy Agency Bioenergy Task 32 Combustion and Co-firing, and Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Verenum Zürich, 2004, ISBN 3-908705-07-X

Nussbaumer, T.; Hasler, P.: Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen, *Holz als Roh-und Werkstoff* 57, 1999, 13–22

Nussbaumer, T.: Combustion and Co-Combustion of Biomass, *12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energie, Industry and Climate Protection*, 17–21 June 2002, Amsterdam, Volume I, ISBN 88-900442-5-X, ISBN 3-936338-10-8, 31–37

Nussbaumer, Th. und Good, J.: Messtechnik für Ofenbauer, *K&L Magazin*, 2 1996, 23 – 30

Nussbaumer, Th.: Grundlagen der Holzverbrennung, *Schweizerische Schreinerzeitung* Nr. 16 1991

Nussbaumer, Th.: *Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz*, Diss ETH Nr. 8838, Zürich 1989

Nussbaumer, Th.: Stickoxide bei der Holzverbrennung, *Heizung Klima* 12 1988, 51-62

Nussbaumer, Th.: Wärmekraftkopplung mit Holz: Stand der Technik, Verfahrensvergleich und Wirtschaftlichkeit, *5. Holzenergie-Symposium*, 16. Oktober 1998, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern 1998, 9 – 44

Nussbaumer, Th.; Good, J. (Red.): *Projektieren automatischer Holzfeuerungen*, Pacer, BfK, Bern 1995, 191 S., ISBN 3-905232-63-4

Nussbaumer, Th.; Good, J.; Jenni, A.; Bühler, R.; Gabathuler, H.R.: *QS Holzheizung: Automatische Holzheizungen: Planung und Ausführung*. Bundesamt für Energie, Bern 2001

Nussbaumer, Th.; Neuenschwander, P.; Hasler, Ph.; Bühler, R.; Jenni, A.: *Energie aus Holz – Vergleich der Verfahren zur Produktion von Wärme, Strom und Treibstoffen aus Holz*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1997

Osteroth, D.: *Biomasse: Rückkehr zum ökologischen Gleichgewicht*, Springer 1992, ISBN 3-540-55331-2

Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.R.: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. 67. Auflage, ISBN 3-486-26213-0, Oldenburg, 1995

Reinmuth, F.: Energieeinsparung in der Gebäudetechnik, Vogel-Verlag Würzburg 1994, ISBN3-8023-1502-2

Schu, G.F.: Betriebserfahrungen mit dem SNCR-Verfahren an einem mit Heizöl S gefeuerten Flammrohrkessel, *Brennstoff Wärme Kraft* 42 (1990) Nr. 3, Specail Betriebserfahrungen REA, L 289 - L 35

Schuster, F.: *Verbrennungslehre, Brennstoff- und Verbrennungs-Grundlagen*, R. Oldenburg Verlag München 1970

Spliethoff, H.: NOX-Minderung durch Brennstoffstufung mit kohlestämmigen Reduktionsgasen, *VDI-Berichte* Nr. 765 1989, 217-230

Sterkele, U.: Alternativenergie im Kosten- und Ökovergleich, *Spektrum der Gebäudetechnik* 5 2001, 42–45

Stieglitz, L.; Vogg, H. 1988: Carbonaceous Particles in the Fly Ash - A Source for the Formation of PCDD/PCDF in Incineration Processes, ISWA Proc. Vol. 1 (1988), 331-335

Suter, P.: *Erneuerbare Energien*, Vorlesungsskript Institut für Energietechnik ETH Zürich 1991

Suttor, K.; Suttor, W.: *Handbuch Kraft-Wärme-Kopplung*,C.F. Müller,Karlsruhe 1991

VDI 4600: Verein Deutscher Ingenieure: *Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden*, VDI-Richtlinie 4600, Düsseldorf (D), 1997

Vehlow, J.: Auftreten von Dioxinen bei der Holzverbrennung und Möglichkeiten der Minimierung, *WKI-Bericht Nr. 22*, Herausgeber R. Marutzky, Wilhelm-Klauditz-Institut, Braunschweig 1990

Vogg, H.: Aktuelle technische Fragen zum Minimierungsgebot für Dioxine/Furane bei Abfallverbrennungsprozessen, *WLB Wasser, Luft und Boden* 11-12 1989, Special 25 Jahre Drehrohrofen, 25-28

Voss, A.: Erneuerbare Energien und nachhaltige Energieversorgung, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Vortrag am *Zukunftskurs Energie: Innovation und Evaluation im Energiebereich im 21. Jahrhundert*, Frankfurt/Main, 14.11.2002 vom 14.11. 2002 in Frankfurt, www.ier.uni-stuttgart.de

von Turegg, R.: Richtige und effiziente Staubabscheidung – Technologien und Potentiale, *VDI-Bericht 1319, Thermische Biomassenutzung*, Tagung Salzburg 23./24.4.1997, Düsseldorf 1997, 167 – 198

Wagner, H.-J.; Gürzenich, D.; Pick, E.: Kumulierter Energie Aufand of Wind Energie and Solar Water *Heating Systems, International Renewable Energie Magazine*, 1999

Wokaun, A.: Erneuerbare Energien, B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1999, ISBN 3-519-03550-2

Zogg, M.: Heizen mit 150% statt 90% Nutzungsgrad, *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Nr. 43 (1995), 985 – 987