

Feuerungstechnische Berechnung von Schornsteinabmessungen

Begriffe, ausführliches Berechnungsverfahren

DIN
4705
Teil 1

Calculation of inside dimensions of chimneys; Definitions, detailed
example for calculation

Ersatz für Ausgabe 09.79

Beginn der Gültigkeit:

Diese Norm gilt ab 1. Oktober 1993.

Daneben gilt DIN 4705 Teil 1, Ausgabe September 1979, noch bis zum 31. März 1994.

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	2
2 Begriffe	2
3 Formelzeichen, Benennungen, Einheiten	3
4 Grundzüge des Berechnungsverfahrens	5
5 Abgaswertetripel für den Wärmeerzeuger	5
6 Bauartkennwerte	6
7 Grundwerte für die Berechnung	7
8 Ermittlung der Temperaturen	8
9 Ermittlung der Dichte des Abgases und der Abgasgeschwindigkeit	9
10 Unterdruck und notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein	9
11 Funktionskontrolle und Grenzen	11
12 Nebenluft	13
13 Abgasanlagen für Abgase mit niedrigen Temperaturen	15
Anhang A Formblatt und Berechnungsbeispiele	42
Erläuterungen	83
Zitierte Normen und andere Unterlagen	85

Fortsetzung Seite 2 bis 86

Normenausschuß Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN

1 Anwendungsbereich und Zweck

Diese Norm gilt für die feuerungstechnische Berechnung von Abmessungen von Schornsteinen aller Art und Verbindungsstücken aller Art, für Feuerungen mit festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen, für alle Wärmeleistungen. Sie gilt auch für die feuerungstechnische Berechnung von Abmessungen von Abgasanlagen für Abgase mit niedrigen Temperaturen. Sie kann sinngemäß auch für Schornsteine für Feuerungen mit anderen Brennstoffen und für Luftleitungen angewendet werden (z.B. Heizraumabluftschächte, Einzelschachtanlagen nach DIN 18 017 Teil 1). Für freistehende Industrieschornsteine kann diese Norm sinngemäß angewendet werden (siehe Erläuterungen). Bei der Berechnung kann der Einfluß von Nebenluftvorrichtungen mit berücksichtigt werden.

Zweck dieser Norm ist es, die Grundlagen für die Berechnung von Abmessungen für Schornsteine und Abgasanlagen aufzuzeigen. Schornsteine, an die mehrere Feuerstätten angeschlossen sind, werden in dieser Norm nicht im einzelnen behandelt. Schornsteine mit über der Höhe konischem Querschnittsverlauf werden in dieser Norm nicht behandelt, hierfür ist ein separater Teil der DIN 4705 vorgesehen.

2 Begriffe

2.1 Schornstein

Schornsteine sind Schächte, die im oder am Gebäude oder freistehend angeordnet sind. Sie sind dazu bestimmt, Abgase ins Freie zu fördern. Für die bautechnischen Anforderungen gelten z.B. DIN 18 160 Teil 1, DIN 1056, DIN 4133.

2.2 Verbindungsstück

Verbindungsstücke sind Leitungen, die Abgase von Feuerstätten in Schornsteine leiten, siehe DIN 18 160 Teil 1 und Teil 2.

2.3 Feuchteunempfindlicher Schornstein

Feuchteunempfindlich sind Schornsteine, bei denen die Abgasfeuchte, die bei ständigem Betrieb mit Innenwandtemperaturen unterhalb der Wasserdampftaupunkttemperatur des Abgases auftritt, nicht zu Gefahren oder unzumutbaren Belästigungen führt. Im Folgenden wird unterschieden zwischen herkömmlichen (nicht feuchteunempfindlichen) und feuchteunempfindlichen Schornsteinen.

2.4 Abgasanlage für Abgase mit niedrigen Temperaturen

Abgasanlagen für Abgase mit niedrigen Temperaturen, im folgenden Abgasanlagen genannt, sind Bauteile in oder an Gebäuden, die dazu bestimmt sind, Abgase von Feuerstätten mit niedrigen Temperaturen über das Dach ins Freie zu fördern. Abgasanlagen bestehen aus Abgasleitungen (Rohre, Formstücke einschließlich ihrer Verbindungen, Halterungen und gegebenenfalls erforderlichen Dämmschichten, Verkleidungen und Kondensatableitungen) sowie den innerhalb von Gebäuden erforderlichen Schächten (senkrechte Bauteile) oder Kanälen (waagerechte Bauteile) einschließlich gegebenenfalls erforderlicher Dämmschichten und Dampfsperren. Abgasleitungen, die planmäßig unter Überdruck betrieben werden, sind innerhalb von Gebäuden über ihre gesamte Länge hinterlüftet. Die Hinterlüftung erfolgt durch den zwischen Abgasleitung und Schacht verbleibenden Ringspalt gleich- oder gegensinnig zum Abgasstrom in der Abgas-

leitung. Der Ringspalt zwischen Abgasleitung und Schacht kann zur Belüftung bzw. zur Führung der Verbrennungsluft dienen.

Abgasleitungen sind dichte, abgas- und kondensatbeständige Leitungen, in denen Abgas gegebenenfalls unter Überdruck abgeführt wird. Bei bestimmungsgemäßem Betrieb darf der Wasserdampftaupunkt der Abgase unter-, aber die bauartbedingte maximale Abgastemperatur nicht überschritten werden.

2.5 Wärmeleistung

2.5.1 Nennwärmeleistung

Die Nennwärmeleistung Q_N des Wärmeerzeugers ist die vom Hersteller für bestimmte Brennstoffe angegebene Dauerleistung des Wärmeerzeugers (höchste in der Zeiteinheit an den Wärmeträger nutzbar abgegebene Wärmemenge); siehe Erläuterungen, Abschnitt 3).

Bei handbeschickten Feuerungen ist die Nennwärmeleistung die mittlere Leistung über eine Abbrandperiode.

2.5.2 Wärmeleistungsbereich

Der Wärmeleistungsbereich ist der vom Hersteller für bestimmte Brennstoffe festgelegte Bereich, in dem der Wärmeerzeuger eingesetzt werden kann. Bei Heizkesseln z.B. wird dabei vorausgesetzt, daß die Anforderungen von DIN 4702 Teil 1 erfüllt sind. Der höchste Wert des Wärmeleistungsbereiches gilt als Nennwärmeleistung bei öl- oder gasbefeuelten Wärmeerzeugern.

2.6 Feuerungs-Wärmeleistung

Die Feuerungs-Wärmeleistung Q_F ist die Wärmeleistung, die der Feuerung des Wärmeerzeugers mit dem Brennstoff zugeführt wird, wobei der Heizwert H_u zugrunde gelegt wird.

2.7 Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers

Der Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers η_W ist das Verhältnis der an den Wärmeträger abgegebenen nutzbaren Wärmeleistung zu der Feuerungs-Wärmeleistung.

2.8 Abgas

Abgas im Sinne dieser Norm ist, unabhängig von der Brennstoffart, das Gasgemisch, das bei ordnungsgemäßem Betrieb eines Wärmeerzeugers durch seinen Abgasstutzen strömt.

2.9 Abgasmassenstrom

Der Abgasmassenstrom $\dot{m}$ ist die in der Zeiteinheit abzuführende Masse der Abgase.

2.10 Wirksame Schornsteinhöhe

Die wirksame Schornsteinhöhe H ist der Höhenunterschied zwischen der Achse der Abgaseinführung in den Schornstein und der Mündung. Für Abgasanlagen gilt entsprechend der Höhenunterschied zwischen dem Abgaseintritt in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage und der Mündung.

2.11 Wirksame Höhe des Verbindungsstückes

Die wirksame Höhe des Verbindungsstückes H_V ist der Höhenunterschied zwischen dem Abgasstutzen des Wärmeerzeugers und der Abgaseinführung in den Schornstein.

Bei offenen Kaminen ist anstelle des Abgasstutzens die Oberkante der Feuerraumöffnung anzusetzen.

Bei Abgasanlagen gilt entsprechend der Höhenunterschied zwischen dem Abgasstutzen des Wärmeerzeugers und dem Abgaseintritt in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage.

2.12 Ruhedruck

Der Ruhedruck im Schornstein P_H ist der sich aus den unterschiedlichen Dichten ergebende Druckunterschied zwischen der Luft im Freien und dem Abgas in der Höhe der Abgaseinführung bei ruhender Strömung.

Entsprechendes gilt für das Verbindungsstück bzw. die Abgasanlage.

2.13 Widerstandsdruck

Der Widerstandsdruck im Schornstein P_R ist die zur Deckung der Strömungswiderstände beim Transport des Abgases im Schornstein erforderliche Druckdifferenz.

Entsprechendes gilt für das Verbindungsstück bzw. die Abgasanlage.

2.14 Unterdruck an der Abgaseinführung

Der Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein P_Z ist der statische Unterdruck im Abgas in Höhe der Achse der Abgaseinführung gegenüber dem statischen Druck der Luft im Freien in gleicher Höhe. Er ergibt sich aus dem Ruhedruck an dieser Stelle, vermindert um den Widerstandsdruck.

Entsprechendes gilt für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, die mit Unterdruck betrieben wird.

2.15 Notwendiger Förderdruck für den Wärmeerzeuger

Der notwendige Förderdruck für den Wärmeerzeuger P_W ist der Druckunterschied zwischen dem statischen Druck der Luft im Aufstellungsraum des Wärmeerzeugers und dem statischen Druck des Abgases im Abgasstutzen, der für den ordnungsgemäßen Betrieb des Wärmeerzeugers erforderlich ist. Bei Wärmeerzeugern mit nachgeschaltetem Saugzuggebläse tritt an die Stelle des Abgasstutzens des Wärmeerzeugers der Abgasaustrittsstutzen des Saugzuggebläses.

2.16 Notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück

Der notwendige Förderdruck für das Verbindungsstück P_{FV} ist der durch das Abführen des Abgases infolge Ruhe- und Widerstandsdruck verursachte Druckunterschied zwischen Abgasstutzen und Abgaseinführung in den Schornstein.

Entsprechendes gilt für den waagrechten Abschnitt der Abgasanlage.

2.17 Notwendiger Förderdruck für die Zuluft

Der notwendige Förderdruck für die Zuluft P_L ist die Differenz zwischen dem statischen Druck der Luft im Freien und dem statischen Druck der Luft im Aufstellungsraum des Wärmeerzeugers in gleicher Höhe.

Der notwendige Förderdruck für die Zuluft stellt sicher, daß soviel Außenluft in den Aufstellungsraum des Wärmeerzeugers einströmt, wie diesem Verbrennungs- und Abluft entnommen werden.

2.18 Notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung

Der notwendige Unterdruck an der Abgaseinführung P_{Ze} ergibt sich bei einem Schornstein aus der Summe des notwendigen Förderdruckes für den Wärmeerzeuger, des notwendigen Förderdruckes für das Verbindungsstück und des notwendigen Förderdruckes für die Zuluft.

Entsprechendes gilt für den senkrechten Abschnitt von Abgasanlagen, die mit Unterdruck betrieben werden.

2.19 Überdruck an der Abgaseinführung

Der Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage $P_{ZÜ}$ ist der statische Überdruck im Abgas in Höhe der Achse der Abgaseinführung gegenüber dem statischen Druck der Luft im Freien in gleicher Höhe. Er ergibt sich aus dem Widerstandsdruck vermindert um den Ruhedruck an dieser Stelle.

2.20 Zur Verfügung stehender Förderdruck (Überdruck) des Wärmeerzeugers

Der zur Verfügung stehende Förderdruck (Überdruck) des Wärmeerzeugers $P_{WÜ}$ ist der Druckunterschied zwischen dem statischen Druck des Abgases im Abgasstutzen und dem statischen Druck der Luft im Aufstellungsraum, der für den ordnungsgemäßen Betrieb des Wärmeerzeugers nicht überschritten werden darf. Der Förderdruck darf den bauartbedingten maximal zulässigen Überdruck in der Abgasleitung nicht überschreiten.

2.21 Maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage

Der maximal nutzbare Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage $P_{ZÜe}$ ergibt sich aus dem zur Verfügung stehenden Förderdruck des Wärmeerzeugers, vermindert um den notwendigen Förderdruck für den waagrechten Abschnitt der Abgasanlage und den notwendigen Förderdruck für die Zuluft.

2.22 Nebenluft

Nebenluft ist die Luft, die dem Abgas aus der Umgebung beigemischt wird und die nicht an der Verbrennung teilnimmt. Nebenluft kann über eine Nebenluftvorrichtung oder eine Strömungssicherung dem Abgas beigemischt werden.

2.23 Nebenluftvorrichtung

Eine Nebenluftvorrichtung ist ein Bauteil, durch das dem Schornstein und Verbindungsstück bei ausreichendem Unterdruck während des Betriebes des Wärmeerzeugers selbsttätig Nebenluft zugeführt wird.

2.24 Strömungssicherung

Eine Strömungssicherung ist eine Einrichtung, die im Abgasweg einer Gasfeuerstätte mit Brenner ohne Gebläse angeordnet ist, um den Einfluß von unterschiedlichen Unterdrücken von der Feuerstätte fernzuhalten.

2.25 Grenztemperatur

Die Grenztemperatur des Abgases T_g ist die Temperatur, die an der Innenwand der Schornsteinmündung nicht unterschritten werden darf.

3 Formelzeichen, Benennungen, Einheiten

Die angegebenen Formelzeichen werden, soweit erforderlich, durch ein oder mehrere Indizes als Hinweis für Orte und Stoffe ergänzt.



Formelzeichen	Benennung	Einheit
A	Fläche	m^2
c	spezifische Wärmekapazität	$g/(kg \cdot K)$
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität des Abgases	$J/(kg \cdot K)$
d	Schichtdicke	m
D	Durchmesser	m
D_h	hydraulischer Durchmesser	m
f_u	Faktor für den minimalen Unterdruck	$Pa/m \cdot K$
f_g	Faktor für die minimale Geschwindigkeit	m/s
H	wirksame Schornsteinhöhe	m
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
K	Abkühlzahl	—
L	gestreckte Länge	m
$\dot{m}$	Abgasmassenstrom	kg/s
Nu	Nusselt-Zahl	—
p	statischer Druck	Pa
P_E	Widerstandsdruck aus Reibung und Formwiderstand im Schornstein	Pa
P_{FV}	notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück	Pa
P_G	Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im Schornstein	Pa
P_H	Ruhedruck des Schornsteins	Pa
P_L	Außenluftdruck	Pa
P_L	notwendiger Förderdruck für die Zuluft	Pa
P_R	Widerstandsdruck im Schornstein	Pa
P_W	notwendiger Förderdruck für den Wärmeerzeuger	Pa
$P_{WÜ}$	zur Verfügung stehender Förderdruck (Überdruck) des Wärmeerzeugers	Pa
P_Z	Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein	Pa
P_{Ze}	notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein	Pa
$P_{ZÜ}$	Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
$P_{ZÜe}$	maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
Pr	Prandtl-Zahl	—
Q	Wärmeleistung	kW
Q_F	Feuerungswärmeleistung	kW
Q_N	Nennwärmeleistung	kW
r	mittlere Rauigkeit der Innenwand	m
R	spezifische Gaskonstante	$J/(kg \cdot K)$
Re	Reynolds-Zahl	—
S_E	strömungstechnische Sicherheitszahl	—
S_H	Korrekturfaktor für fehlende Temperaturbeharrung	—
s	lichte Weite	m

Formelzeichen	Benennung	Einheit
t	Temperatur	$^{\circ}C$
T	Temperatur, absolut	K
T_g	Grenztemperatur, absolut	K
T_m	mittlere Temperatur der Abgassäule, absolut	K
T_p	Taupunkttemperatur, absolut	K
U	Umfang	m
w	über einen Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit	m/s
w_m	über eine Strecke gemittelte Geschwindigkeit	m/s
y	Formbeiwert	—
z	geodätische Höhe	m
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
β	Verhältnis der Massenströme Verbrennungsluft zu Abgas	—
γ	Winkel bei Richtungsänderungen	Grad
δ	Wandendicke	m
η_w	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers	—
η_{WN}	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers bei Nennwärmeleistung	—
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
$\left(\frac{1}{A}\right)$	Wärmedurchlaßwiderstand	$(m^2 \cdot K)/W$
ψ	Rohrreibungszahl	—
η	dynamische Viskosität	Ns/m^2
ϱ	über einen Querschnitt gemittelte Dichte der Abgase	kg/m^3
ϱ_m	über eine Strecke gemittelte Dichte der Abgase	kg/m^3
$\sigma(CO_2)$	Volumenkonzentration an CO_2	%
$\sigma(H_2O)$	Volumenkonzentration an Wasserdampf	%

Als Hinweis für Orte und Stoffe werden folgende Indizes verwendet:

Formelzeichen	Benennung	Einheit
a	Außenseite	—
A	Abgas	—
b	Temperaturbeharrung	—
B	Verbrennungsluft	—
e	Eintritt	—
G	Geschwindigkeitsänderung	—
i	Innenseite	—
L	Außenluft	—
M	Mischung	—
m	Mittelwert	—
n	laufender Index	—
o	Austritt	—
u	Umgebungsluft	—
$Ü$	Überdruck	—
V	Verbindungsstück	—
W	Wärmeerzeuger	—
NL	Nebenluft	—

4 Grundzüge des Berechnungsverfahrens

Die Berechnung der Abmessungen von herkömmlichen Schornsteinen, von feuchteunempfindlichen Schornsteinen und von Abgasanlagen, die mit Unterdruck betrieben werden (Querschnitte bzw. Höhen), beruht auf dem Vergleich des Unterdruckes an der Abgaseinführung in den Schornstein bzw. in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage mit dem notwendigen Unterdruck an dieser Stelle, sowie auf dem Vergleich der Innenwandtemperatur an der Mündung mit der Grenztemperatur.

Bei Abgasanlagen, die mit Überdruck betrieben werden, tritt anstelle des Unterdruckvergleiches der Vergleich zwischen dem Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage mit dem maximal nutzbaren Überdruck an dieser Stelle. Der Vergleich der Innenwandtemperatur an der Abgasleitungsmündung mit der Grenztemperatur erfolgt wie bei Abgasanlagen, die mit Unterdruck betrieben werden.

Das Berechnungsverfahren in den Abschnitten 4 bis 11 wird am Beispiel des herkömmlichen und des feuchteunempfindlichen Schornsteins dargestellt. Für die Berechnung von Abgasanlagen siehe Abschnitt 13.

4.1 Druckbedingung

Der Vergleich des Unterdruckes an der Abgaseinführung in den Schornstein mit dem notwendigen Unterdruck an dieser Stelle ist nach folgender Bedingung zu führen:

$$P_Z = P_H - P_R \geq P_W + P_{FV} + P_L = P_{Ze} \quad \text{in Pa} \quad (1)$$

In Gleichung (1) bedeuten:

P_Z	Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein	in Pa
P_{Ze}	notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein	in Pa
P_H	Ruhedruck des Schornsteins	in Pa
P_R	Widerstandsdruck im Schornstein	in Pa
P_W	notwendiger Förderdruck für den Wärmeerzeuger	in Pa
P_{FV}	notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück	in Pa
P_L	notwendiger Förderdruck für die Zuluft	in Pa

4.2 Temperaturbedingung

Der Vergleich der Innenwandtemperatur an der Schornsteinmündung mit der zulässigen Grenztemperatur des Abgases ist nach folgender Bedingung zu führen:

$$T_{iob} \geq T_g \quad \text{in K} \quad (2)$$

In Gleichung (2) bedeuten:

T_{iob}	Innenwandtemperatur an der Schornsteinmündung, bei Temperaturbelastung	in K
T_g	zulässige Grenztemperatur des Abgases	in K

Als zulässige Grenztemperatur ist bei herkömmlichen Schornsteinen die Wasserdampftaupunkttemperatur des Abgases ($T_g = T_p$) anzusetzen.

Bei feuchteunempfindlichen Schornsteinen ist die zulässige Grenztemperatur die Vereisungstemperatur ($T_g = 273,15 \text{ K}$).

4.3 Berechnungsgang

Zur Berechnung der Druck- und Temperaturgrößen in den Gleichungen (1) und (2) müssen zuerst die Werte für das Abgaswertetripel nach Abschnitt 5 ermittelt werden. Der Abschnitt 6 enthält die Gleichungen für die Ermittlung der maßgebenden strömungsunabhängigen Bauartkennwerte

des Verbindungsstückes und des Schornsteins. Nach Abschnitt 7 sind die Grundwerte für die Berechnung zu bestimmen. In den Abschnitten 8 und 11.2 sind die Gleichungen zur Ermittlung der Temperaturen zusammengestellt. Die Dichte des Abgases und die Abgasgeschwindigkeit ist nach Abschnitt 9 zu ermitteln. In Abschnitt 10 sind die für die Bestimmung der Druckgrößen notwendigen Gleichungen angegeben. Die Überprüfung der Druckbedingung (Gleichung (1)), der Temperaturbedingung (Gleichung (2)) und der Einhaltung der Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Rechenverfahrens erfolgt nach den Angaben in Abschnitt 11.

Der Druck- und Temperaturnachweis ist für die Nennwärmeleistung und für die kleinste vorgesehene stationäre Wärmeleistung zu führen. Nebenluft braucht in der Berechnung nicht berücksichtigt zu werden, falls die Druck- und Temperaturbedingungen sowie die Grenzen (siehe Abschnitt 11.3) eingehalten sind.

Wenn die Temperaturbedingung oder die Grenze 2 (Gleichung (38)) nicht erfüllt sind, kann gegebenenfalls durch Berücksichtigung von dem Abgas zugemischter Nebenluft der Temperaturnachweis bzw. die Überprüfung der Grenze 2 nach Abschnitt 12 geführt werden.

5 Abgaswertetripel für den Wärmeerzeuger

Für die Berechnung der Temperaturen und der Drücke ist das maßgebende Abgaswertetripel des Wärmeerzeugers, bestehend aus dem Abgasmassenstrom, der Abgastemperatur und dem notwendigen Förderdruck für den Wärmeerzeuger zu ermitteln. Zusätzlich sind die Art des Brennstoffes, die Volumenkonzentration an CO_2 der Abgase und die Geometrie des Abgasstutzens anzugeben.

5.1 Abgasmassenstrom

5.1.1 Abgasmassenstrom bei Nennwärmeleistung

Für die Berechnung der Druckgrößen und der Temperaturen in den Gleichungen (1) und (2) ist der Abgasmassenstrom bei Nennwärmeleistung des Wärmeerzeugers zu ermitteln.

Dabei sind die Abgasmassenströme und zugehörigen Volumenkonzentrationen an CO_2 der Abgase üblicherweise für die den zulässigen Brennstoffen zugeordneten Nennwärmeleistungen des Wärmeerzeugers den Herstellerangaben zu entnehmen.

Liegen diese Angaben nicht vor, so kann der Abgasmassenstrom in Abhängigkeit vom Luftüberschuß aus den Bildern 1 bis 6 entnommen werden. Die in diesen Bildern gezeichneten breiten Linien stellen die Abgasmassenströme für Wärmeerzeuger dar, welche die heiztechnischen Anforderungen der DIN 4702 Teil 1 erfüllen. Die Diagramme in den Bildern 1 bis 6 sind mit den in den Tabellen 1 und 2 genannten Gleichungen aufgestellt. Sofern keine Herstellerangaben für die Volumenkonzentrationen an CO_2 vorliegen, können auch diese nach den Bildern 1 bis 6 bestimmt werden.

Bei Wärmeerzeugern für die Verfeuerung verschiedener Brennstoffe soll der Schornstein für den voraussichtlich überwiegend verwendeten Brennstoff berechnet und ausgelegt werden.

Sollen andere Brennstoffe verfeuert werden, so ist zu prüfen, ob der Schornstein für die dann gegebenen Betriebsbedingungen geeignet ist. Erforderlichenfalls ist die Nennwärmeleistung für den zweiten Brennstoff auf den größten mit dem Schornstein abzuführenden Abgasmassenstrom zu begrenzen.

Bei Gasfeuerstätten mit Brennern ohne Gebläse ist der Abgasmassenstrom hinter der Strömungssicherung, in

Strömungsrichtung gesehen, maßgebend. Dabei beinhaltet der Abgasmassenstrom die bei planmäßigem Betrieb abzuführende Nebenluft.

Der Abgasmassenstrom bei offenen Kaminen ist nach DIN 18 895 zu ermitteln. Zur Ermittlung der Stoffwerte kann näherungsweise eine Volumenkonzentration an CO₂ von 1 % angesetzt werden.

5.1.2 Abgasmassenstrom bei der kleinsten möglichen Wärmeleistung

Kann die Feuerung betriebsüblich mit veränderbarer Wärmeleistung betrieben werden, ist zusätzlich bei der Druck- und Temperaturbedingung vom Abgasmassenstrom bei der kleinsten möglichen stationären Wärmeleistung auszugehen. Sofern der Hersteller der Feuerung nichts anderes angibt, ist als kleinster Abgasmassenstrom ein Drittel des Abgasmassenstromes bei Nennwärmeleistung anzunehmen und die Wärmeleistung entsprechend zu begrenzen.

5.1.3 Abgasmassenstrom mit Nebenluft

Wird über eine Nebenluftvorrichtung oder über eine Strömungssicherung dem Abgas Nebenluft zugeführt, ist der Nebenluftmassenstrom nach Abschnitt 12.3 abhängig von der zur Verfügung stehenden Druckdifferenz zwischen Aufstellraum und Schornstein bzw. Verbindungsstück zu ermitteln.

5.2 Abgastemperatur

5.2.1 Abgastemperatur bei Nennwärmeleistung

Die Abgastemperatur ist für die niedrigste planmäßige Betriebstemperatur des Wärmeträgers bei Nennwärmeleistung vom Hersteller anzugeben. Bei Gasfeuerstätten mit Brennern ohne Gebläse ist die Abgastemperatur nach der Strömungssicherung, in Strömungsrichtung gesehen, maßgebend.

Die Abgastemperatur nach der Strömungssicherung einer Gasfeuerstätte mit Brenner ohne Gebläse kann für die Rechnung mit Nebenluft, soweit in der jeweiligen Geräternorm geregelt und vom Hersteller angegeben, in Abhängigkeit vom statischen Unterdruck im Abgasstutzen bei den Berechnungen zum Temperaturnachweis verwendet werden.

5.2.2 Abgastemperatur bei der kleinsten möglichen Wärmeleistung

Für die Überprüfung nach Abschnitt 5.1.2 ist die Abgastemperatur für die niedrigste planmäßige Betriebstemperatur bei der kleinsten möglichen stationären Wärmeleistung der Feuerung vom Hersteller anzugeben. Liegt sie nicht vor, so kann die Abgastemperatur in °C zu zwei Dritteln des Wertes bei der Nennwärmeleistung angenommen werden wenn die kleinste mögliche Wärmeleistung 1/3 der Wärmeleistung nicht unterschreitet.

5.3 Notwendiger Förderdruck für den Wärmeerzeuger

Der notwendige Förderdruck für den Wärmeerzeuger P_W ist bezogen auf den lichten Querschnitt des Abgasstutzens nach Angabe des Herstellers einzusetzen. Liegen keine Angaben vor, so ist z. B. für Wärmeerzeuger, die den Anforderungen der DIN 4702 Teil 1 entsprechen, der dort genannte notwendige Förderdruck zu verwenden (siehe Bild 7 und Tabelle 2). Bei Überdruckfeuerungen und für ventilatorunterstützte Feuerstätten nach DIN 3368 Teil 5 und Teil 6, ist der notwendige Förderdruck $P_W \geq 0$ Pa anzusetzen.

Bei Gasfeuerungen mit Strömungssicherung ist der notwendige Förderdruck hinter der Strömungssicherung von ihrer Gestaltung abhängig. Liegen keine gesicherten Herstellerangaben vor, kann für Heizkessel nach DIN 4702 Teil 3 und Gaswasserheizer nach DIN 3368 Teil 2 und

Teil 4 der notwendige Förderdruck mit 3 Pa, für andere Gasfeuerstätten mit Strömungssicherung mit 10 Pa angesetzt werden.

6 Bauartkennwerte

Für die Berechnung der Druck- und Temperaturgrößen sind die Rauigkeit der Innenwand und der Wärmedurchlaßwiderstand für das Verbindungsstück und den Schornstein zu ermitteln.

6.1 Rauigkeit

Die mittlere Rauigkeit von Innenschalen aus üblichen Baustoffen ist der Tabelle 3 zu entnehmen. Für neue Baustoffe ist die mittlere Rauigkeit von Innenschalen durch Messung zu ermitteln, wobei ein brennstoffspezifischer Zuschlag für eine mögliche Verschmutzung zu berücksichtigen ist.

6.2 Wärmedurchlaßwiderstand

Der Wärmedurchlaßwiderstand ($1/\Delta$) von Hausschornsteinen nach DIN 18 160 Teil 1 ist dieser Norm, den Registrierbescheiden*) oder den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen**) zu entnehmen. Als Wärmedurchlaßwiderstand ist dabei der niedrigste Wert der entsprechenden Wärmedurchlaßwiderstandsgruppe zu verwenden.

Der Wärmedurchlaßwiderstand kann näherungsweise nach folgenden Gleichungen ermittelt werden, wenn gesicherte Stoffeigenschaften und Schichtdicken bekannt sind und keine behördlichen Regelungen dem entgegenstehen:

- a) Bei Kenntnis der Wärmedurchlaßwiderstände der einzelnen Rohrschalen

$$\left(\frac{1}{\Delta}\right) = D_h \cdot \sum_n \left[\left(\frac{1}{\Delta}\right)_n \cdot \frac{1}{D_{h,n}} \right] \quad \text{in m}^2\text{K/W} \quad (3)$$

- b) Bei Kenntnis der Wärmeleitfähigkeiten λ_n der Schichten

$$\left(\frac{1}{\Delta}\right) = y \cdot \sum_n \left[\frac{D_h}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln \left(\frac{D_{h,n+1}}{D_{h,n}} \right) \right] \quad \text{in m}^2\text{K/W} \quad (4)$$

In den Gleichungen (3) und (4) bedeuten:

$\left(\frac{1}{\Delta}\right)_n$ Wärmedurchlaßwiderstand einer Rohrschale, bezogen auf deren innere Mantelfläche in m²K/W

y Formbeiwert

= 1,0 für runden und ovalen Querschnitt

= 1,1 für quadratischen und für rechteckigen Querschnitt bis zu einem Seitenverhältnis von 1 : 1,5

D_h innerer hydraulischer Durchmesser in m

$D_{h,n}$ hydraulischer Durchmesser der Innenseite jeder Schicht in m

λ_n Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes der Schicht bei Betriebstemperatur (siehe Tabelle 4) in W/(m · K)

Der Wärmedurchlaßwiderstand ist für einige einfache Konstruktionen in den Bildern 8 und 9 dargestellt. Der Wärmedurchlaßwiderstand von ruhenden Luftschichten ist in Tabelle 5 dargestellt.

*) Registrierbescheide der Deutschen Gesellschaft für Warenkennzeichnung (DGWK) im DIN, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin

**) Zulassungen erteilt das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt), Reichpietschufer 72–76, 10785 Berlin

7 Grundwerte für die Berechnung

7.1 Lufttemperaturen

Bei Schornsteinen muß zwischen der Außenlufttemperatur und der Umgebungslufttemperatur unterschieden werden (siehe Tabelle 6).

7.1.1 Außenlufttemperatur

Die Außenlufttemperatur t_L ist üblicherweise mit 15°C ($T_L = 288,15$ K) einzusetzen.

7.1.2 Umgebungslufttemperatur

Die Umgebungslufttemperatur t_u ist für die Überprüfung der Druckbedingung mit 15°C ($T_u = 288,15$ K) einzusetzen.

Die Umgebungslufttemperatur ist für die Überprüfung der Temperaturbedingung bei Schornsteinen gegenüber beheizten Räumen mit 20°C, gegenüber nicht beheizten Räumen mit 0°C und gegenüber dem Freien für herkömmliche Schornsteine mit 0°C und für feuchteunempfindliche und freistehende Schornsteine mit -15°C anzusetzen.

Schornsteine, die abschnittsweise in Bereichen mit unterschiedlichen Umgebungslufttemperaturen angeordnet sind, können entweder abschnittsweise berechnet werden (Abschnitte mit jeweils gleichen Umgebungslufttemperaturen) oder es kann für die Berechnung die Umgebungslufttemperatur entsprechend den Flächenanteilen in unterschiedlichen Umgebungslufttemperaturbereichen gemittelt werden, jedoch nicht mehr als 15°C. Wenn die Flächenanteile außen gegenüber dem Freien und nicht beheizten Räumen $\frac{1}{4}$ der gesamten Schornsteinaußenfläche nicht übersteigen, kann die Umgebungslufttemperatur mit 15°C angesetzt werden. Die Umgebungslufttemperaturen für Verbindungsstücke sind sinngemäß wie bei Schornsteinen anzusetzen.

7.2 Außenluftdruck

Der Außenluftdruck p_L ist in Abhängigkeit von der Höhenlage zu ermitteln.

$$p_L = p_{L0} \cdot e^{(-g \cdot z)/(R_L T_L)} - 4300 \quad \text{in Pa} \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

p_{L0}	Außenluftdruck auf Meereshöhe = 101 320 Pa bei 15°C	
g	Erdbeschleunigung = 9,81 m/s ²	
R_L	Gaskonstante der Luft	in J/kg · K
T_L	Außenlufttemperatur	in K
z	geodätische Höhe	in m
4300	Witterungsbedingter Schwankungsbereich des Außenluftdruckes	in Pa

7.3 Gaskonstante

7.3.1 Gaskonstante der Luft

Die Gaskonstante der Luft R_L (Luftfeuchte $\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 1,1$ %) beträgt 288 J/kgK.

7.3.2 Gaskonstante des Abgases

Die Gaskonstante des Abgases R ist von der Abgaszusammensetzung abhängig.

Der Wert R für die wichtigsten Brennstoffe für einen planmäßigen Betrieb ohne Kondensation, z.B. in herkömmlichen Schornsteinen, bzw. für einen planmäßigen Betrieb mit Teilkondensation, z.B. in feuchteunempfindlichen Schornsteinen, ist Bild 10 zu entnehmen.

Die Berechnungsdaten von Bild 10 sind in Tabelle 1 enthalten.

7.4 Dichte der Außenluft

Die Dichte der Außenluft ρ_L errechnet sich aus

$$\rho_L = \frac{p_L}{R_L \cdot T_L} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (6)$$

Hierin bedeuten:

p_L	Außenluftdruck	in Pa
T_L	Außenlufttemperatur	in K
R_L	Gaskonstante der Luft	in J/kg · K

7.5 Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität des Abgases ist für verschiedene Brennstoffe in den Bildern 11, die Ausgangswerte für die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität sind in Tabelle 1 angegeben.

7.6 Taupunkttemperatur

Die Wasserdampftaupunkttemperatur des Abgases ist für verschiedene Brennstoffe und Volumenkonzentrationen an CO₂ im Abgas aus Bild 12 und Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Taupunkterhöhung durch Schwefelsäure im Abgas kann aus Bild 13 entnommen werden. Für die genaue Bestimmung des Säuretaupunktes ist die Kenntnis der Konvertierung von Schwefeldioxid in Schwefeltrioxid notwendig (als Anhaltswert kann davon ausgegangen werden, daß die Volumenkonzentration an Schwefeltrioxid $\sigma(\text{SO}_3)$ etwa 1 % der des Schwefeldioxids beträgt). Der Schwefelgehalt des Brennstoffes kann entsprechenden Brennstoff-Normen, z.B. für Heizöl DIN 51 603 Teil 1 bis 3, entnommen werden.

7.7 Korrekturfaktor für fehlende Temperaturbeherrschung

Der Korrekturfaktor S_H dient zur Berücksichtigung des Einflusses der fehlenden Temperaturbeherrschung im Verbindungsstück und im Schornstein auf die Abkühlung der Abgase und damit auf den Ruhedruck des Schornsteins. Damit auch bei einer instationären Betriebsweise, die z.B. bei jeder Feuerung mit EIN/AUS-Regelung vorliegt, eine Berechnung des Schornsteinquerschnittes mit den für stationäre Betriebsverhältnisse abgeleiteten Formeln möglich ist, müssen der für stationäre Betriebsverhältnisse ermittelte Wärmedurchlaßwiderstand des Verbindungsstücks und des Schornsteins sowie der Wärmeübergangswiderstand an der Außenfläche des Verbindungsstücks und des Schornsteins korrigiert werden.

Der Korrekturfaktor hängt im wesentlichen von der Betriebsweise der Feuerstätte und der Bauweise des Schornsteins ab. Bei Feuerungen mit EIN/AUS-Regelung ist für S_H ein Wert von 0,5 einzusetzen.

7.8 Strömungstechnische Sicherheitszahl

Die strömungstechnische Sicherheitszahl S_E hat die Aufgabe folgende ungewollte Unregelmäßigkeiten bei Betrieb und Ausführung des Schornsteins abzudecken:

- Unplanmäßige Überbelastung des Wärmeerzeugers
- Größerer Luftüberschuß in den Abgasen als angenommen
- Falschlufzutritt zum Abgas im Verbindungsstück oder Schornstein
- Abweichung von der zugrunde gelegten mittleren Rauigkeit der Innenschale des Schornsteines
- Abweichung vom zugrunde gelegten Wärmedurchlaßwiderstand der Schornsteinwandung
- Maßabweichungen des Schornsteininnenquerschnittes
- Ungünstige atmosphärische Einflüsse

Die strömungstechnische Sicherheitszahl ist mit $S_E = 1,5$ anzusetzen, sie deckt der Erfahrung nach geringe, ungewollte Abweichungen, wie oben genannt, dann ab, wenn die Feuerungsanlage nach dem Stand der Technik ordnungsgemäß erstellt und betreut wird. Für Schornsteine mit lichten Weiten über 0,5 m kann in begründeten Fällen — wenn durch Planung und Überwachung die o. g. Einflüsse zuverlässig ausgeschlossen werden können — der Wert S_E bis auf 1,2 verringert werden. Für Schornsteine nach DIN 4133, die planmäßig mit Überdruck betrieben werden, kann der Wert S_E ebenfalls bis auf 1,2 verringert werden.

8 Ermittlung der Temperaturen

Für den Druck- und Temperaturnachweis sind die mittleren Abgastemperaturen und die Abgastemperaturen am Schornsteineintritt und an der Schornsteinmündung zu ermitteln.

Die mittlere Temperatur des Abgases T_m ist nach der folgenden Gleichung zu berechnen.

$$T_m = T_u + \frac{T_e - T_u}{K} \cdot (1 - e^{-K}) \quad \text{in K} \quad (7)$$

Die Abgastemperatur an der Mündung T_o errechnet sich aus der folgenden Gleichung:

$$T_o = T_u + (T_e - T_u) \cdot e^{-K} \quad \text{in K} \quad (8)$$

Die mittlere Temperatur des Abgases im Verbindungsstück T_{mV} ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$T_{mV} = T_u + \frac{T_W - T_u}{K_V} \cdot (1 - e^{-K_V}) \quad \text{in K} \quad (9)$$

Die Abgastemperatur am Schornsteineintritt T_e errechnet sich aus der folgenden Gleichung:

$$T_e = T_u + (T_W - T_u) \cdot e^{-K_V} \quad \text{in K} \quad (10)$$

In den Gleichungen (7) bis (10) bedeuten:

T_u	Umgebungslufttemperatur (siehe Abschnitt 7.1)	in K
K	Abkühlzahl (siehe Abschnitt 8.1)	—
T_W	Abgastemperatur des Wärmeerzeugers	in K
K_V	Abkühlzahl des Verbindungsstückes (siehe Abschnitt 8.1)	—

8.1 Berechnung der Abkühlzahl

Die Abkühlzahl K errechnet sich aus der folgenden Gleichung:

$$K = \frac{U \cdot k \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (11)$$

Hierin bedeuten:

U	innerer Schornsteinumfang	in m
k	Wärmedurchgangskoeffizient bei den tatsächlichen Materialtemperaturen (siehe Abschnitt 8.2)	in $W/(m^2 \cdot K)$
L	gestreckte Länge des Schornsteins, entspricht der wirksamen Schornsteinhöhe bei lotrechten Schornsteinen	in m
$\dot{m}$	Abgasmassenstrom (siehe Abschnitt 5.1)	in kg/s
c_p	spezifische Wärmekapazität des Abgases (siehe Abschnitt 7.5)	in $J/(kg \cdot K)$

Für die Abkühlzahl K_V des Verbindungsstückes sind die entsprechenden Werte des Verbindungsstückes einzusetzen.

8.2 Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient des Schornsteins bei

Temperaturbeharrung k_b ist nach der folgenden Gleichung zu berechnen:

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha} \cdot \alpha_a}} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (12)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient des Schornsteins für fehlende Temperaturbeharrung k ist nach der folgenden Gleichung zu errechnen:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + S_H \cdot \left[\left(\frac{1}{\lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha} \cdot \alpha_a}\right]} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (13)$$

In den Gleichungen (12) und (13) bedeuten:

S_H	Korrekturfaktor für fehlende Temperaturbeharrung (siehe Abschnitt 7.7)	—
$\left(\frac{1}{\lambda}\right)$	Wärmedurchlaßwiderstand bei Temperaturbeharrung (siehe Abschnitt 6.2)	in $(m^2 \cdot K)/W$
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m
D_{ha}	äußerer hydraulischer Durchmesser	in m
α_i	innerer Wärmeübergangskoeffizient (siehe Abschnitt 8.2.1)	in $W/(m^2 \cdot K)$
α_a	äußerer Wärmeübergangskoeffizient (siehe Abschnitt 8.2.2)	in $W/(m^2 \cdot K)$

8.2.1 Wärmeübergangskoeffizient, innen

Der Wärmeübergangskoeffizient im Schornstein α_i errechnet sich aus der folgenden Gleichung:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_A \cdot Nu}{D_h} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (14)$$

Hierin bedeuten:

λ_A	Wärmeleitfähigkeit des Abgases	in $W/(m \cdot K)$
Nu	Nusselt-Zahl	—
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m

Die Wärmeleitfähigkeit des Abgases λ_A ist von der mittleren Abgastemperatur abhängig (siehe Bild 14 und Tabelle 1).

Die mittlere Nusselt-Zahl über der Schornsteinhöhe Nu ergibt sich für turbulente Rohrströmung aus

$$Nu = \left(\frac{\psi}{\psi_{glatt}}\right)^{0,67} \cdot 0,0214 \cdot (Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{L_{ges}}\right)^{0,67}\right] \quad (15)$$

Hierin bedeuten:

ψ	Rohrreibungszahl für hydraulisch raue Strömung; siehe Bild 17	—
ψ_{glatt}	Rohrreibungszahl für hydraulisch glatte Strömung; siehe Bild 17 ($r = 0$ m)	—
Re	Reynolds-Zahl	—
Pr	Prandtl-Zahl	—
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m
L_{ges}	gesamte gestreckte Länge vom Abgaseintritt in den Schornstein bis zur Schornsteinmündung (beim Verbindungsstück gilt analog L_{Vges} : gesamte gestreckte Länge vom Abgasstutzen des Wärmeerzeugers zum Abgaseintritt in den Schornstein)	in m

Die Gleichung kann für $2300 < Re < 10\,000\,000^*)$ und $\left(\frac{\psi}{\psi_{\text{glatt}}}\right) < 3$ sowie $0,6 < Pr < 1,5$ angewendet werden.

Die Prandtl-Zahl Pr ergibt sich aus der Gleichung:

$$Pr = \frac{\eta_A \cdot c_p}{\lambda_A} \quad (16)$$

Die Reynolds-Zahl Re ergibt sich aus der Gleichung:

$$Re = \frac{w_m \cdot D_h \cdot \rho_m}{\eta_A} \quad (17)$$

In den Gleichungen (16) und (17) bedeuten:

w_m	mittlere Abgasgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 9)	in m/s
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m
η_A	dynamische Viskosität	in Ns/m^2
ρ_m	mittlere Dichte des Abgases	in kg/m^3
c_p	spezifische Wärmekapazität des Abgases	in $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$
λ_A	Wärmeleitfähigkeit des Abgases	in $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$

Die dynamische Viskosität η_A ist von der Abgastemperatur abhängig (siehe Bild 15 und Tabelle 1).

Für Schornsteine, in denen die Abgasgeschwindigkeit zwischen 0,5 und 20 m/s und die Abgastemperatur zwischen 20 und 300 °C beträgt, kann α_i z.B. für eine Handrechnung vereinfacht mit der folgenden Gleichung (18) (in Zweifelsfällen gilt Gleichung 14) berechnet werden:

$$\alpha_i = \left(\frac{\psi}{\psi_{\text{glatt}}}\right)^{0,67} \cdot (0,92 + 0,0006 \cdot t_m) \cdot \left[3,6 \cdot \left(\frac{4 \dot{m}}{U}\right)^{0,8} - 0,065\right] \frac{1}{D_h} \quad (18)$$

Hierin bedeuten:

$\psi, \psi_{\text{glatt}}, D_h$	siehe Legende zu Gleichung (15)	—
t_m	mittlere Temperatur des Abgases	in °C
$\dot{m}$	Abgasmassenstrom	in kg/s
U	innerer Schornsteinumfang	in m

Der Faktor $\left(\frac{\psi}{\psi_{\text{glatt}}}\right)^{0,67}$ kann für Berechnungen mit Gleichung (18) wie folgt angenähert werden:

r in m	0,001	0,0015	0,002	0,003	0,005
$\left(\frac{\psi}{\psi_{\text{glatt}}}\right)^{0,67}$	1,15	1,20	1,26	1,34	1,42

Der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i ist in Abhängigkeit vom Abgasmassenstrom und vom inneren hydraulischen Durchmesser in Bild 16 angegeben.

Der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i kann auch bei feuchteunempfindlichen Schornsteinen und bei Abgasanlagen wie angegeben errechnet werden, wenn die Kondensationswärme nicht berücksichtigt wird.

8.2.2 Wärmeübergangskoeffizient außen

Der äußere Wärmeübertragungskoeffizient α_a ist für innenliegende Verbindungsstücke und Schornsteine mit $\alpha_a = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; für freiliegende Verbindungsstücke und freistehende Schornsteine mit $\alpha_a = 23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ einzusetzen.

Für teilweise im Freien liegende Verbindungsstücke oder teilweise freistehende Schornsteine ist der Wärmeübergangskoeffizient α_a entsprechend den Anteilen der Mantelflächen zwischen den beiden Werten zu interpolieren.

Weisen Verbindungsstücke oder Schornsteine im Freien Verkleidungen (belüftet oder nicht belüftet) mit einer Schichtdicke von mindestens 1 cm und höchstens 5 cm auf, kann vereinfachend mit dem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_a = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ gerechnet werden, wenn ein eventuell vorhandener Wärmedurchlaßwiderstand der Verkleidung oder Ummantelung bei der Rechnung vernachlässigt wird (siehe Abschnitt 11.2).

9 Ermittlung der Dichte des Abgases und der Abgasgeschwindigkeit

Die mittlere Dichte des Abgases ρ_m ist mit ausreichender Genauigkeit nach der folgenden Gleichung zu bestimmen:

$$\rho_m = \frac{p_L}{R \cdot T_m} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (19)$$

Hierin bedeuten:

p_L	Außenluftdruck (siehe Abschnitt 7.2)	in Pa
R	Gaskonstante des Abgases	in $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$
T_m	mittlere Temperatur des Abgases (siehe Abschnitt 8)	in K

Die mittlere Abgasgeschwindigkeit w_m läßt sich aus der folgenden Gleichung errechnen:

$$w_m = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_m} \quad \text{in m/s} \quad (20)$$

Hierin bedeuten:

$\dot{m}$	Abgasmassenstrom (siehe Abschnitt 5.1)	in kg/s
A	lichter Schornsteinquerschnitt	in m^2
ρ_m	mittlere Dichte des Abgases	in kg/m^3

Für die mittlere Dichte des Abgases ρ_{mV} und die mittlere Abgasgeschwindigkeit im Verbindungsstück w_{mV} sind die entsprechenden Werte des Verbindungsstückes einzusetzen.

10 Unterdruck und notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein

10.1 Berechnung des Unterdruckes an der Abgaseinführung in den Schornstein

Der Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein P_Z ist in erster Linie abhängig vom Abgasmassenstrom und von der Abgastemperatur, von der wirksamen Schornsteinhöhe, vom Querschnitt und von den maßgebenden Bauartkennwerten (Rauigkeit und Wärmedurchlaßwiderstand) des Schornsteins.

Der Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein P_Z ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Ruhedruck und dem Widerstandsdruck.

$$P_Z = P_H - P_R \quad \text{in Pa} \quad (21)$$

Hierin bedeuten:

P_H	Ruhedruck im Schornstein	in Pa
P_R	Widerstandsdruck im Schornstein	in Pa

*) Für Reynoldszahlen bis 1000000 ist die Gleichung durch Versuche bestätigt.

10.1.1 Ruhedruck im Schornstein

Der Ruhedruck P_H im Schornstein ist aus der Gleichung

$$P_H = H \cdot g \cdot (\varrho_L - \varrho_m) \quad \text{in Pa} \quad (22)$$

zu errechnen.

Hierin bedeuten:

H	wirksame Schornsteinhöhe	in m
g	Erdbeschleunigung = 9,81 m/s ²	
ϱ_L	Dichte der Außenluft	in kg/m ³
ϱ_m	mittlere Dichte der Abgassäule	in kg/m ³

10.1.2 Widerstandsdruck im Schornstein

Der Widerstandsdruck im Schornstein P_R ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$P_R = S_E \cdot P_E + S_{EG} \cdot P_G \quad \text{in Pa} \quad (23)$$

$$P_R = S_E \cdot \left(\psi \cdot \frac{L}{D_h} + \sum_n \zeta_n \right) \frac{\varrho_m}{2} \cdot w_m^2 + S_{EG} \cdot P_G \quad \text{in Pa} \quad (24)$$

für $P_G \geq 0$ gilt $S_{EG} = S_E$

für $P_G < 0$ gilt $S_{EG} = 1,0$

In den Gleichungen (23) und (24) bedeuten:

P_E	Widerstandsdruck aus Reibung und Formwiderstand im Schornstein	in Pa
P_G	Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im Schornstein	in Pa
S_E	strömungstechnische Sicherheitszahl	
S_{EG}	strömungstechnische Sicherheitszahl für Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung	
ψ	Rohrreibungszahl	
L	gestreckte Schornsteinlänge	in m
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m
$\sum_n \zeta_n$	Summe der Einzelwiderstandszahlen	
ϱ_m	mittlere Dichte der Abgassäule	in kg/m ³
w_m	mittlere Abgasgeschwindigkeit	in m/s

10.1.2.1 Rohrreibungszahl

Die Rohrreibungszahl ψ kann für verschiedene Rauigkeiten aus Bild 17 entnommen werden.

Für eine mittlere Rauigkeit der Innenwand von $0,001 \text{ m} \leq r \leq 0,005 \text{ m}$, für übliche Geschwindigkeiten und Abmessungen zwischen $D_h = 0,1 \text{ m}$ bis $1,0 \text{ m}$ kann vereinfachend die in Bild 18 dargestellte Näherungsgleichung angewendet werden, in Zweifelsfällen gilt Bild 17.

10.1.2.2 Einzelwiderstand

Die Summe der Einzelwiderstandszahlen des Schornsteins $\sum \zeta_n$ ist abhängig von den Querschnitts- und Richtungsänderungen im Schornstein (siehe Tabelle 7). Der Einzelwiderstand für die Querschnittserweiterung an der Mündung kann entfallen, wenn die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung an dieser Stelle nicht berücksichtigt wird.

10.1.2.3 Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung

Die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung P_G ist aus der nachfolgenden Gleichung zu errechnen.

$$P_G = \frac{\varrho_2}{2} \cdot w_2^2 - \frac{\varrho_1}{2} \cdot w_1^2 \quad \text{in Pa} \quad (25)$$

Hierin bedeuten:

ϱ_1	Dichte des Abgases vor der Geschwindigkeitsänderung	in kg/m ³
ϱ_2	Dichte des Abgases nach der Geschwindigkeitsänderung	in kg/m ³
w_1	Abgasgeschwindigkeit vor der Geschwindigkeitsänderung	in m/s
w_2	Abgasgeschwindigkeit nach der Geschwindigkeitsänderung	in m/s

Für die Dichten und Geschwindigkeiten vor und nach einer Geschwindigkeitsänderung können die Mittelwerte für die entsprechenden Abschnitte eingesetzt werden.

10.2 Notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein

Der notwendige Unterdruck P_{Ze} an der Abgaseinführung in den Schornstein setzt sich aus dem notwendigen Förderdruck für den Wärmeerzeuger P_W , dem notwendigen Förderdruck für das Verbindungsstück P_{FV} und dem notwendigen Förderdruck für die Zuluft P_L zusammen.

$$P_{Ze} = P_W + P_{FV} + P_L \quad \text{in Pa} \quad (26)$$

10.2.1 Notwendiger Förderdruck für den Wärmeerzeuger

Der notwendige Förderdruck für den Wärmeerzeuger ist nach Abschnitt 5.3 zu ermitteln.

10.2.2 Notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück

Der notwendige Förderdruck für das Verbindungsstück P_{FV} kann mit der nachfolgend genannten Gleichung berechnet werden:

$$P_{FV} = P_{RV} - P_{HV} \quad \text{in Pa} \quad (27)$$

Hierin bedeuten:

P_{RV}	Widerstandsdruck im Verbindungsstück	in Pa
P_{HV}	Ruhedruck im Verbindungsstück	in Pa

Besteht das Verbindungsstück aus mehreren unterschiedlichen Abschnitten unterschiedlicher Bauarten, ist die Rechnung für jeden Abschnitt durchzuführen. Die Widerstandsdrücke und die Ruhedrucke bzw. die notwendigen Förderdrücke der einzelnen Abschnitte sind zu summieren.

10.2.2.1 Ruhedruck im Verbindungsstück

Der Ruhedruck des Verbindungsstückes P_{HV} ist aus der folgenden Gleichung zu errechnen.

$$P_{HV} = H_V \cdot g \cdot (\varrho_L - \varrho_{mV}) \quad \text{in Pa} \quad (28)$$

Hierin bedeuten:

H_V	Differenz der Höhen zwischen dem Abgaseintritt in den Schornstein und dem Abgasstutzen des Wärmeerzeugers	in m
	in Strömungsrichtung steigend +	
	in Strömungsrichtung fallend -	
g	Erdbeschleunigung = 9,81 m/s ²	
ϱ_L	Dichte der Außenluft (siehe Abschnitt 7.4)	in kg/m ³
ϱ_{mV}	mittlere Dichte des Abgases im Verbindungsstück	in kg/m ³

Sofern das Verbindungsstück ohne nennenswerte Steigung oder Gefälle zum Schornstein führt, kann der Ruhedruck des Verbindungsstückes vernachlässigt werden.

Liegt der Abgaseintritt in den Schornstein tiefer als der Abgasstutzen des Wärmeerzeugers, so wird H_V negativ.

Die mittlere Dichte des Abgases ϱ_{mV} kann nach Abschnitt 9, Gleichung (19), mit den entsprechenden Werten für das Verbindungsstück berechnet werden.

10.2.2.2 Widerstandsdruck im Verbindungsstück

Der Widerstandsdruck im Verbindungsstück P_{RV} ist aus der Beziehung zu errechnen:

$$P_{RV} = S_E \cdot P_{EV} + S_{EGV} \cdot P_{GV} \quad \text{in Pa} \quad (29)$$

$$P_{RV} = S_E \cdot \left(\psi_V \cdot \frac{L_V}{D_{hV}} + \sum_n \zeta_{Vn} \right) \frac{\varrho_{mV}}{2} \cdot w_{mV}^2 + S_{EGV} \cdot P_{GV} \quad \text{in Pa} \quad (30)$$

für $P_{GV} \geq 0$ gilt $S_{EGV} = S_E$

für $P_{GV} < 0$ gilt $S_{EGV} = 1,0$

In den Gleichungen (29) und (30) bedeuten:

P_{EV} Widerstandsdruck aus Reibung und Formwiderstand im Verbindungsstück in Pa

P_{GV} Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im Verbindungsstück in Pa

S_E Strömungstechnische Sicherheitszahl —

S_{EGV} Strömungstechnische Sicherheitszahl für Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung —

ψ_V Rohrreibungszahl des Verbindungsstückes (siehe Abschnitt 10.1.2.1) —

L_V gestreckte Länge des Verbindungsstückes in m

D_{hV} innerer hydraulischer Durchmesser des Verbindungsstückes in m

$\sum_n \zeta_{Vn}$ Summe der Einzelwiderstandszahlen durch Umlenkungen und Querschnittsänderungen —

ϱ_{mV} mittlere Dichte der Abgassäule im Verbindungsstück in kg/m³

w_{mV} mittlere Geschwindigkeit des Abgases im Verbindungsstück in m/s

Die mittlere Geschwindigkeit w_{mV} des Abgases im Verbindungsstück ist nach Abschnitt 9, Gleichung (20) mit den Werten für das Verbindungsstück zu berechnen.

Die Rohrreibungszahl des Verbindungsstückes ist nach Abschnitt 10.1.2.1 mit den Werten für das Verbindungsstück zu berechnen.

Die Summe der Einzelwiderstandszahlen $\sum_n \zeta_{Vn}$ für das Verbindungsstück ist abhängig von den Querschnitts- und Richtungsänderungen zwischen Abgasstutzen des Wärmeerzeugers und Schornstein. ζ -Werte sind für die üblichen Querschnitts- und Richtungsänderungen in Tabelle 7 angegeben.

Bei einer Querschnittserweiterung vom Abgasstutzen des Wärmeerzeugers auf das Verbindungsstück ist der Strömungswiderstand auf die Geschwindigkeit im Abgasstutzen zu beziehen. Der sich ergebende Widerstandsdruck ist zu dem des Verbindungsstückes zu addieren.

Die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im Verbindungsstück P_{GV} ist aus Abschnitt 10.1.2.3, Gleichung (25) mit den Werten für das Verbindungsstück zu berechnen.

Für die Dichten und Geschwindigkeiten vor und nach einer Geschwindigkeitssänderung können die Mittelwerte für die entsprechenden Abschnitte eingesetzt werden.

10.2.2.3 Notwendiger Förderdruck für die Zuluft

Der notwendige Förderdruck für die Zuluft P_L ist entsprechend der Beschaffenheit des Aufstellungsraums des

Wärmeerzeugers zu bestimmen (Größe, Art und Zahl der Fenster und Türen, Ausstattung mit Lüftungsanlagen und weiteren Wärmeerzeugern usw.).

Für Aufstellungsräume mit Lüftungsanlagen für Heizräume ist P_L mit 3 Pa anzusetzen. Für Räume ohne Lüftungsanlagen (Lüftungsanlagen, die nur Luft im Aufstellungsraum umwälzen, bleiben außer Betracht) ist P_L mit mindestens 4 Pa anzusetzen.

Wird dem Aufstellraum von Wärmeerzeugern mit Feuerungseinrichtungen die Verbrennungsluft durch dichte Leitungen mit über die Länge gleichbleibendem Querschnitt zugeführt, ergibt sich P_L aus folgender Gleichung:

$$P_L = S_{EB} \cdot \left(\psi_B \cdot \frac{L_B}{D_{hB}} + \sum_n \zeta_{B,n} \right) \frac{\varrho_m}{2} \cdot w_B^2 \quad \text{in Pa} \quad (31)$$

Hierin bedeuten:

ψ_B Rohrreibungszahl für die Verbrennungsluftleitung —

L_B gestreckte Länge der Verbrennungsluftleitung in m

D_{hB} innerer hydraulischer Durchmesser der Verbrennungsluftleitung in m

$\sum_n \zeta_{B,n}$ Widerstandszahl für die Verbrennungsluftleitung —

ϱ_B Dichte der Verbrennungsluft in kg/m³

w_B Geschwindigkeit in der Verbrennungsluftleitung in m/s

S_{EB} Strömungstechnische Sicherheitszahl von Abgasanlagen für die Verbrennungsluftansaugung im Ringspalt (Gegenstrom-Abgasanlagen $S_{EB} = 1,2$; sonstige Anlagen $S_{EB} = 1,0$)

Für die Ermittlung der Rohrreibungszahl für die Verbrennungsluftleitung ψ_B gilt Abschnitt 10.1.2.1 entsprechend.

Für die mittlere Rauigkeit von Ringspaltinnenwänden ist der jeweils größere Wert einzusetzen.

Die Einzelwiderstandszahlen für die Verbrennungsluftleitung $\sum_n \zeta_{B,n}$ für Richtungsänderungen in der Leitung können Tabelle 7 entnommen werden. Sie sind über die ganze Länge der Leitung zu summieren.

Die Geschwindigkeit in der Verbrennungsluftleitung w_B ergibt sich aus dem maßgeblichen Verbrennungsluft-Massenstrom $\beta \cdot \dot{m}$, dem lichten Querschnitt der Verbrennungsluftleitung A_B und der Dichte der Verbrennungsluft ϱ_B nach folgender Gleichung:

$$w_B = \frac{\beta \cdot \dot{m}}{A_B \cdot \varrho_B} \quad \text{in m/s} \quad (32)$$

Dabei bedeutet β das Verhältnis der Massenströme Verbrennungsluft zu Abgas.

Bei Wärmeerzeugern mit Feuerungseinrichtungen für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe kann $\beta = 0,9$ gesetzt werden.

Die Dichte der Verbrennungsluft ist für eine Lufttemperatur von 15 °C zu ermitteln, wenn sie nicht eigens beheizt oder gekühlt wird.

11 Funktionskontrolle und Grenzen

11.1 Druckbedingung

Bei Schornsteinen ist der Vergleich des Unterdruckes an der Abgaseinführung P_Z mit dem notwendigen Unterdruck an dieser Stelle P_{Ze} nach folgender Bedingung zu führen:

$$P_Z \geq P_{Ze} \quad \text{in Pa} \quad (33)$$



11.2 Temperaturbedingung

Der Vergleich der Innenwandtemperatur an der Schornsteinmündung T_{ioB} ist mit der zulässigen Grenztemperatur des Abgases T_g nach folgender Bedingung zu führen:

$$T_{\text{ioB}} \geq T_g \quad \text{in K} \quad (34)$$

Hierzu ist die Innenwandtemperatur T_{ioB} mit der nachstehenden Gleichung zu ermitteln:

$$T_{\text{ioB}} = T_{\text{ob}} - \frac{k_{\text{ob}}}{\alpha_i} \cdot (T_{\text{ob}} - T_{\text{uo}}) \quad \text{in K} \quad (35)$$

Hierin bedeuten:

T_{ob}	Abgastemperatur an der Schornsteinmündung bei Temperaturbeherrschung (siehe Abschnitt 8)	in K
k_{ob}	Wärmedurchgangskoeffizient an der Schornsteinmündung	in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
α_i	innerer Wärmeübergangskoeffizient (siehe Abschnitt 8.2.1)	in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
T_{uo}	Umgebungslufttemperatur für den Temperaturvergleich an der Schornsteinmündung	in K

Der Wärmedurchgangskoeffizient an der Schornsteinmündung k_{ob} bei Temperaturbeherrschung ist mit

$$k_{\text{ob}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{A}\right) + \left(\frac{1}{A}\right)_o + \frac{D_h}{D_{\text{hao}} \cdot \alpha_{\text{ao}}}} \quad \text{in } \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (36)$$

zu ermitteln.

Hierin bedeuten:

$\left(\frac{1}{A}\right)$	Wärmedurchlaßwiderstand (siehe Abschnitt 6.2)	in $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
$\left(\frac{1}{A}\right)_o$	zusätzlich anrechenbarer Wärmedurchlaßwiderstand an der Schornsteinmündung	in $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m
D_{hao}	äußerer hydraulischer Durchmesser an der Schornsteinmündung	in m
α_i	innerer Wärmeübergangskoeffizient	in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
α_{ao}	äußerer Wärmeübergangskoeffizient an der Schornsteinmündung	in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Der zusätzlich anrechenbare Wärmedurchlaßwiderstand an der Schornsteinmündung $(1/A)_o$ ist für allseits angebrachte zusätzliche Wärmedämmung nach Abschnitt 6.2 für diese Schichten zu berechnen. Luftschichten mit einer Schichtdicke kleiner 1 cm dürfen für den zusätzlich anrechenbaren Wärmedurchlaßwiderstand $(1/A)_o$ nicht berücksichtigt werden. Bei belüfteten Verkleidungen gilt grundsätzlich $(1/A)_o = 0 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ für die Schichten an der Außenseite des Belüftungsspalt. Ein Wert von $(1/A)_o = 0,1 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ darf ohne weiteren Nachweis angesetzt werden, wenn der Schornstein über Dach eine Ummauerung (Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0,85 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) von mindestens 11,5 cm Dicke aufweist oder allseitig mit mindestens 3 cm zusätzlicher Dämmung (Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) versehen ist. Wenn der Schornstein im Kaltbereich im Gebäude nicht über die gesamte Höhe zusätzlich gedämmt ist, darf der Wert für den zusätzlich anrechenbaren Wärmedurchlaßwiderstand $(1/A)_o$ den Wert von $0,1 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ nicht übersteigen. Wenn der Schornstein im gesamten Kaltbereich zusätzlich gedämmt ist, darf bei feuchteunempfindlichen Schornsteinen der nach Abschnitt 6.2 errechnete Wert, bei her-

kömmlichen Schornsteinen der errechnete Wert, maximal aber $(1/A)$ für $(1/A)_o$ angesetzt werden.

Der äußere Wärmeübergangskoeffizient an der Schornsteinmündung α_{ao} ist mit $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ anzusetzen. Bei belüfteten Verkleidungen mit einer Lüftungsspaltstärke 1 bis 5 cm kann $\alpha_{\text{ao}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gesetzt werden. Ebenso kann bei Schornsteinen mit zusätzlicher äußerer Verkleidung vereinfachend $\alpha_{\text{ao}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gesetzt werden, wenn der Wert für den zusätzlich anrechenbaren Wärmedurchlaßwiderstand der äußeren Verkleidung bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten an der Schornsteinmündung k_{ob} vernachlässigt wird.

11.3 Voraussetzungen für die Anwendung des Rechenverfahrens

Für die Anwendbarkeit der Rechenverfahren müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt werden.

Zur Sicherung der Rechenergebnisse sind folgende Grenzen einzuhalten.

11.3.1 Minimaler Unterdruck

Die Grenze 1 zur Sicherstellung eines minimalen Unterdruckes legt die maximale Belastbarkeit des Schornsteins fest. Sie soll sicherstellen, daß eine geringfügige Veränderung des Abgasmassenstroms keine unzulässige Änderung des Unterdruckes verursacht.

Es gilt:

$$P_Z \geq P_{Z \text{ min}} = f_u \cdot H \cdot (T_e - T_L) \quad \text{in Pa} \quad (37)$$

Hierin bedeuten:

f_u	Faktor für den minimalen Unterdruck	
	Unterdruck	$= \frac{1}{175} \quad \text{in Pa}/(\text{m} \cdot \text{K})$
H	Schornsteinhöhe	in m
T_e	Temperatur an der Abgaseinführung in den Schornstein	in K
T_L	Außenlufttemperatur	in K

11.3.2 Minimale Geschwindigkeit

Die Grenze 2 zur Sicherstellung einer minimalen Abgasgeschwindigkeit legt die minimale Belastbarkeit des Schornsteins fest. Sie gewährleistet, daß der zur Verfügung stehende Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein bei geringfügiger Verringerung des Abgasmassenstromes nicht wesentlich abfällt. Ebenfalls wird die Forderung, daß ein Falschlufteinbruch an der Schornsteinmündung begrenzt werden muß und damit die Temperaturbedingung rechnerisch nachgewiesen werden kann, erfüllt.

Es gilt:

$$w_m \geq w_{\text{min}} = f_g \cdot \sqrt[4]{\frac{A}{A_o}} \quad \text{in m/s} \quad (38)$$

Hierin bedeuten:

f_g	Faktor für die minimale Geschwindigkeit	$= 0,5 \text{ m/s}$ in m/s
A	lichter Schornsteinquerschnitt	in m^2
A_o	Bezugsgröße	$= 0,01 \text{ m}^2$

11.3.3 Maximale Schlankheit

Die Grenze 3 soll die maximale Schlankheit des Schornsteins festlegen.

Es gilt:

$$\frac{H}{D_h} \leq \left(\frac{H}{D_h} \right)_{\text{max}} = 212,5 - 12\,500 \cdot r \quad (39)$$



Hierin bedeuten:

H	wirksame Schornsteinhöhe	in m
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m
r	mittlere Rauigkeit der Innenwand	in m

Erfahrungsgemäß wird dadurch die Forderung erfüllt, daß sich bei einem Schornstein mit verhältnismäßig geringem Durchmesser geringfügige bauliche Abweichungen nicht zu stark auf den Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein auswirken.

12 Nebenluft

Sofern die Druckbedingungen erfüllt und die Temperaturbedingung nach Gleichung (34) oder die Grenze 2 nach Gleichung 38 nicht eingehalten ist, kann geprüft werden, ob diese Bedingungen mit Berücksichtigung von Nebenluft bei der Berechnung einzuhalten sind.

12.1 Berechnungsgang

Die Berechnung ist abschnittsweise ab Abgasstutzen des Wärmeerzeugers bis zum Einbauort der Nebenluftvorrichtung und von dort mit geänderten Werten für den Abgasmassenstrom, die Abgastemperatur und die Abgaszusammensetzung bis zur Schornsteinmündung durchzuführen. Der Abgasmassenstrom nach der Nebenluftvorrichtung setzt sich zusammen aus dem Abgasmassenstrom vor der Nebenluftvorrichtung und einem Nebenluftmassenstrom. Aus den Temperaturen und der Zusammensetzung des Abgases vor der Nebenluftbeimischung und der Nebenluft sind die Mischtemperatur und die Zusammensetzung des Abgas-Nebenluft-Gemisches hinter der Nebenluftzuführung zu berechnen. Für die weitere Berechnung sind die Stoffgrößen (c_p , R , η_A , T_p , λ_A) in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abgas-Nebenluft-Gemisches zu berechnen.

Die Berechnung ist, ausgehend von einem ausgewählten Nebenluftstrom, iterativ solange durchzuführen, bis die Funktionsbedingungen und Grenzen erfüllt sind oder bis der überschüssige Unterdruck aufgebraucht ist ($P_Z = P_{Ze}$).

Bei Gasfeuerstätten mit Strömungssicherung ist als Nebenluft nur die zusätzlich zum planmäßigen Abgasmassenstrom abzuführende Nebenluft zu berücksichtigen.

12.2 Grundwerte für die Nebenluftberechnung

Für die Berechnung des Nebenluftmassenstromes darf die Außenlufttemperatur für herkömmliche Schornsteine mit 0°C ($T_L = 273,15\text{ K}$) und für feuchteunempfindliche Schornsteine mit -15°C ($T_L = 258,15\text{ K}$) eingesetzt werden. Für die Berechnung des Nebenluftmassenstromes sind die Umgebungslufttemperaturen für die Überprüfung der Temperaturbedingung nach Abschnitt 7.1.2 maßgebend.

12.3 Mischungsgleichungen

Der Massenstrom nach Nebenluftbeimischung $\dot{m}_M$ ist:

$$\dot{m}_M = \dot{m} + \dot{m}_{NL} \quad \text{in kg/s} \quad (40)$$

Die Abgastemperatur nach Nebenluftbeimischung T_M erhält man aus:

$$T_M = \frac{\dot{m} \cdot c_{pA} \cdot T_A + \dot{m}_{NL} \cdot c_{pNL} \cdot T_{NL}}{\dot{m} \cdot c_{pA} + \dot{m}_{NL} \cdot c_{pNL}} \quad \text{in K} \quad (41)$$

Abweichend von Gleichung (41) kann die Abgastemperatur nach der Strömungssicherung von Gasfeuerstätten nach Abschnitt 5.2.1, zweiter Absatz, bestimmt werden. Vereinfachend kann für die spezifische Wärmekapazität c_{pA} des Abgases die mittlere Wärmekapazität c_{pM} des Abschnittes vor der Nebenluftvorrichtung eingesetzt werden.

Die Volumenkonzentration an CO_2 nach Nebenluftbeimischung ist:

$$\sigma(\text{CO}_2)_M = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot [100 - \sigma(\text{H}_2\text{O})] \cdot \sigma(\text{CO}_2)}{\dot{m} \cdot R \cdot [100 - \sigma(\text{H}_2\text{O})] + \dot{m}_{NL} \cdot R_L \cdot [100 - \sigma(\text{H}_2\text{O})_{NL}]} \quad \text{in \%} \quad (42)$$

Der Wasserdampfgehalt nach Nebenluftbeimischung ergibt sich zu:

$$\sigma(\text{H}_2\text{O})_M = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot \sigma(\text{H}_2\text{O}) + \dot{m}_{NL} \cdot R_L \cdot \sigma(\text{H}_2\text{O})_{NL}}{\dot{m} \cdot R + \dot{m}_{NL} \cdot R_L} \quad \text{in \%} \quad (43)$$

Der Wasserdampfgehalt der Nebenluft $\sigma(\text{H}_2\text{O})$ ist mit einer Volumenkonzentration an H_2O (Wasserdampf) von 1,1 % in der Rechnung zu berücksichtigen; dies entspricht etwa 60 % relativer Feuchte bei 15°C .

In den Gleichungen (40) bis (43) bedeuten:

$\dot{m}_M$	Abgasmassenstrom nach der Nebenluftbeimischung	in kg/s
$\dot{m}$	Abgasmassenstrom vor der Nebenluftbeimischung	in kg/s
$\dot{m}_{NL}$	Nebenluftmassenstrom	in kg/s
c_{pA}	spezifische Wärmekapazität des Abgases vor Nebenluftbeimischung	in J/(kg · K)
c_{pNL}	spezifische Wärmekapazität der Nebenluft	in J/(kg · K)
T_M	Temperatur des Abgases nach der Nebenluftbeimischung	in K
T_A	Temperatur des Abgases vor der Nebenluftbeimischung	in K
T_{NL}	Temperatur der Nebenluft	in K
R	Gaskonstante für das Abgas vor der Nebenluftbeimischung	in J/(kg · K)
R_L	Gaskonstante der Luft	in J/(kg · K)
$\sigma(\text{CO}_2)_M$	Volumenkonzentration an CO_2 des Abgases nach der Nebenluftbeimischung	in %
$\sigma(\text{CO}_2)$	Volumenkonzentration an CO_2 des Abgases vor der Nebenluftbeimischung	in %
$\sigma(\text{H}_2\text{O})_M$	Volumenkonzentration an H_2O (Wasserdampf) des Abgases nach der Nebenluftbeimischung	in %
$\sigma(\text{H}_2\text{O})$	Volumenkonzentration an H_2O (Wasserdampf) des Abgases vor der Nebenluftbeimischung	in %
$\sigma(\text{H}_2\text{O})_{NL}$	Volumenkonzentration an H_2O (Wasserdampf) der Nebenluft	in %

12.4 Druckberechnung

12.4.1 Notwendiger Förderdruck für die Zuluft bei Nebenluftvorrichtung

Der notwendige Förderdruck für die Zuluft P_{LNL} bei Nebenluft und Nennwärmeleistung ist:

$$P_{LNL} = P_L \cdot \left[1 + \frac{\dot{m}_{NL}}{\beta \cdot \dot{m}} \right]^n \quad \text{in Pa} \quad (44)$$

Hierin bedeuten:

n	Exponent: bei Öffnung (z. B. Heizraum mit Zuluftöffnung): bei Fuge (z. B. Wohn- und Aufenthaltsraum):	$n = 2$; $n = 1,5$
P_L	Notwendiger Förderdruck für die Zuluft ohne Nebenluft	in Pa
$\dot{m}_{NL}$	Nebenluftmassenstrom	in kg/s
$\dot{m}$	Abgasmassenstrom vor Nebenluftbeimischung	in kg/s
β	Verhältnis der Massenströme Verbrennungsluft/Abgas (siehe Abschnitt 10.2.2.3)	—

Die Änderung des notwendigen Förderdruckes für die Zuluft kann vernachlässigt werden, wenn sichergestellt ist, daß die notwendige Luftmenge für die Verbrennung und für die Nebenluft bei den in Abschnitt 10.2.2.3 genannten Unterdrücken nachströmen kann.

12.4.2 Notwendiger Förderdruck für die Nebenluftvorrichtung bzw. die Strömungssicherung

Der notwendige Förderdruck für die Nebenluftvorrichtung P_{NL} wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$P_{NL} = a_0 + a_1 \cdot \dot{m}_{NL} + a_2 \cdot \dot{m}_{NL}^2 + S_E \cdot (1 + \zeta_{2-3}) \cdot \frac{Q_M}{2} w_M^2 \quad \text{in Pa} \quad (45)$$

Hierin bedeuten:

a_0	— bei Nebenluftvorrichtung: Einstellwert der Nebenluftvorrichtung — bei Strömungssicherung: notwendiger Förderdruck des Wärmeerzeugers einschließlich Strömungssicherung	in Pa
a_1, a_2	Kennwerte der Nebenluftvorrichtung (Werte für Nebenluftvorrichtungen, die nach DIN 4795 geprüft sind: siehe Tabelle 8) bzw. Kennwerte der Strömungssicherung (vom Hersteller anzugeben, soweit in der jeweiligen Gerätenorm geregelt)	in Pa/(kg/s) bzw. in Pa/(kg/s) ²
$\dot{m}_{NL}$	Nebenluftmassenstrom	in kg/s
S_E	Strömungstechnische Sicherheitszahl	—
ζ_{2-3}	Einzelwiderstandszahl für Nebenlufteinführung (siehe Tabelle 7, Nr 5; $A_3 : A_2 = 1,0$; Winkel $\gamma = 90^\circ$)	—
Q_M	Dichte des Abgasgemisches nach der Nebenluftbeimischung	in kg/m ³
w_M	Geschwindigkeit des Abgasgemisches nach der Nebenluftbeimischung	in m/s

Der Einstellwert der Nebenluftvorrichtung a_0 ergibt sich aus der Summe der notwendigen Förderdrücke für den Wärmeerzeuger P_W und für den Abgasweg bis zur Nebenluftvorrichtung. Er muß, entsprechend DIN 4795, mindestens 10 Pa betragen.

Für die Dichte und Geschwindigkeit des Abgasgemisches nach der Nebenluftbeimischung können die Mittelwerte des Abschnittes nach der Nebenluftbeimischung eingesetzt werden.

Für Nebenluftvorrichtungen nach DIN 4795 gilt:

$$\begin{aligned} &\text{— für } P_W + P_{FV1} < 10 && \text{in Pa} && (46) \\ & && a_0 = 10 && \text{in Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{— und für } P_W + P_{FV1} \geq 10 && \text{in Pa} && (47) \\ & && a_0 = P_W + P_{FV1} && \text{in Pa} \end{aligned}$$

Für Strömungssicherungen gilt:

$$a_0 = P_W \quad \text{in Pa} \quad (48)$$

In den Gleichungen (46) bis (48) bedeuten:

P_{FV1}	notwendiger Förderdruck für den Abgasweg bis zur Nebenluftvorrichtung	in Pa
P_W	notwendiger Förderdruck für den Wärmeerzeuger	in Pa

12.4.3 Notwendiger Förderdruck für den Abgasweg bis zur Nebenluftvorrichtung

Der notwendige Förderdruck für den Abgasweg bis zur Nebenluftvorrichtung P_{FV1} ist nach Abschnitt 10.2.2 zu ermitteln. Ist die Nebenluftvorrichtung im Schornstein angeordnet, so kann der Schornsteinabschnitt bis zur Nebenluftvorrichtung wie ein Teilabschnitt des Verbindungsstückes behandelt werden.

12.5 Druck- und Temperaturnachweise; Grenzen

12.5.1 Druckbedingung

Für jeden Nebenluftmassenstrom ist der erforderliche Unterdruck an der Abgaseinführung in den Schornstein P_{Ze} zu ermitteln und mit dem Unterdruck an dieser Stelle P_Z zu vergleichen.

Die nachstehende Bedingung muß erfüllt sein:

$$P_Z = P_H - P_R \geq P_{LNL} + P_{NL} + P_{FV2} = P_{Ze} \quad \text{in Pa} \quad (49)$$

Hierin bedeuten:

P_H	Ruhedruck im Schornstein	in Pa
P_R	Widerstandsdruck im Schornstein	in Pa
P_{LNL}	notwendiger Förderdruck der Zuluft bei Nebenluft	in Pa
P_{NL}	notwendiger Förderdruck für die Nebenluftvorrichtung bzw. für die Strömungssicherung	in Pa
P_{FV2}	notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück nach der Nebenluftvorrichtung	in Pa

Bei Nebenluftvorrichtungen, die im Schornstein über der Abgaseinführung angeordnet sind, kann die Druckbedingung nach der Nebenluftvorrichtung nachgewiesen werden (siehe Bild 20).

12.5.2 Temperaturbedingung

Die Temperaturbedingung an der Schornsteinmündung ist nach Abschnitt 8 und 11.2 mit den Stoffwerten für das Abgas-Nebenluft-Gemisch nachzuweisen.

12.5.3 Grenzen des Rechenverfahrens

Die Grenzen für die Anwendbarkeit des Rechenverfahrens sind nach Abschnitt 11.3 zu überprüfen.

13 Abgasanlagen für Abgase mit niedrigen Temperaturen

Abgasanlagen für Abgase mit niedrigen Temperaturen können planmäßig mit Unter- oder Überdruck betrieben werden.

Weiter werden unterschieden nach Anordnung

- Abgasleitungen bzw. Abgasleitungsabschnitte in Gebäuden
- Abgasleitungen bzw. Abgasleitungsabschnitte im Freien nach der Ausführungsart
- Abgasleitungen in Schächten mit gleichsinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt (Gleichstrom)
- Abgasleitungen in Schächten mit gegensinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt (Gegenstrom)
- Abgasleitungen ohne durchströmten Ringspalt.

Für die genaue Berechnung der Drücke und Temperaturen ist für Abgasleitungen, die in belüfteten Schächten eingebaut sind, die Kenntnis der Wärmeübergangsverhältnisse im Ringspalt erforderlich. Ihre Berechnung ist jedoch sehr aufwendig. Zur Vereinfachung der Berechnung werden im folgenden Festlegungen bezüglich der Berücksichtigung der Wärmedurchlaßwiderstände sowie der Temperaturen und der Wärmeübergangszahlen im Ringspalt getroffen.

Die Druck- und Temperaturverhältnisse können damit entsprechend der Angaben in Abschnitt 4 bis Abschnitt 11 berechnet werden, wobei der senkrecht angeordnete Abschnitt der Abgasanlage dem Schornstein und der waagrecht angeordnete Abschnitt dem Verbindungsstück entspricht.

13.1 Grundzüge des Berechnungsverfahrens für Abgasanlagen

Siehe Abschnitt 4.

Abgasanlagen, die planmäßig mit Unterdruck betrieben werden, können wie feuchteunempfindliche Schornsteine berechnet werden.

Für Abgasanlagen, die planmäßig mit Überdruck betrieben werden, muß nachstehende Druckbedingung erfüllt werden:

$$P_{ZÜ} = P_R - P_H \leq P_{WÜ} - P_L - P_{FV} = P_{ZÜe} \quad \text{in Pa} \quad (50)$$

In Gleichung (50) bedeuten:

- | | | |
|-----------|--|-------|
| $P_{ZÜ}$ | Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrecht angeordneten Abschnitt der Abgasanlage | in Pa |
| $P_{WÜ}$ | zur Verfügung stehender Förderdruck (Überdruck) des Wärmeerzeugers | in Pa |
| $P_{ZÜe}$ | maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrecht angeordneten Abschnitt der Abgasanlage | in Pa |

P_R, P_H, P_L, P_{FV} siehe Formel (1)

Der Temperaturnachweis ist entsprechend dem Temperaturnachweis für feuchteunempfindliche Schornsteine zu führen.

13.2 Abgaswertetripel für den Wärmeerzeuger bei Abgasanlagen

Siehe Abschnitt 5.

Für Abgasanlagen, die planmäßig unter Überdruck betrieben werden, tritt an die Stelle des notwendigen Förderdruckes des Wärmeerzeugers P_W der zur Verfügung stehende Förderdruck des Wärmeerzeugers $P_{WÜ}$.

Der in die Rechnung eingesetzte zur Verfügung stehende Förderdruck des Wärmeerzeugers $P_{WÜ}$ darf den bauartbedingten, maximal zulässigen Überdruck der Abgasleitung nicht übersteigen.

13.3 Bauartkennwerte bei Abgasanlagen

Siehe Abschnitt 6.

Bei Abgasleitungen mit gleich oder gegensinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt bleibt der Wärmedurchlaßwiderstand der Luftschichten, der Schächte und von deren gegebenenfalls vorhandenen Verkleidungen unberücksichtigt (Wärmedurchlaßwiderstand $\frac{1}{A} = 0 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$).

13.4 Grundwerte für die Berechnung von Abgasanlagen

Siehe Abschnitt 7.

Die Außenlufttemperatur t_L und die Umgebungslufttemperatur t_u sind für die Überprüfung der Druckbedingung mit 15°C anzusetzen.

Für den Temperaturnachweis sind für Abgasleitungen folgende Umgebungslufttemperaturen einzusetzen:

- bei gleichsinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt
 - $t_u = 20^\circ\text{C}$ für Abschnitte in beheizten Räumen,
 - $t_u = 0^\circ\text{C}$ für Abschnitte in unbeheizten Räumen und
 - $t_u = -15^\circ\text{C}$ für Abschnitte im Freien oder
 - $t_u = 15^\circ\text{C}$ über die gesamte Länge der Abgasleitung im Schacht, wenn die Länge des Schachtes in nicht beheizten Räumen und im Freien 5 m nicht übersteigt
- bei gegensinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt
 - $t_u = 0^\circ\text{C}$ für Abschnitte in beheizten Räumen,
 - $t_u = -15^\circ\text{C}$ für Abschnitte in nicht beheizten Räumen und im Freien oder
 - $t_u = 0^\circ\text{C}$ über die gesamte Länge der im Gegenstrom hinterlüfteten Abgasleitung, wenn die Länge in nicht beheizten Räumen und im Freien 5 m nicht übersteigt
- bei Abgasleitungen ohne durchströmtem Ringspalt
 - $t_u = 20^\circ\text{C}$ für Abschnitte in beheizten Räumen,
 - $t_u = 0^\circ\text{C}$ für Abschnitte in nicht beheizten Räumen und
 - $t_u = -15^\circ\text{C}$ für Abschnitte im Freien oder
 - $t_u = 15^\circ\text{C}$ über die gesamte Länge der Abgasleitung, wenn die Länge in nicht beheizten Räumen und im Freien $\frac{1}{4}$ der wirksamen Höhe nicht übersteigt

Für die Umgebungslufttemperatur an der Mündung t_{u0} ist für alle Abgasleitungen ein Wert von -15°C einzusetzen.

Die für den Druck- und Temperaturnachweis maßgebenden Außenluft- und Umgebungslufttemperaturen sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Die Gaskonstante R ist entsprechend Bild 10 bzw. Tabelle 1 für einen planmäßigen Betrieb mit Teilkondensation zu wählen.

Bei Abgasanlagen, die planmäßig mit Überdruck betrieben werden, kann der Wert S_E bis auf 1,2 verringert werden. Für Abgasanlagen, die planmäßig mit Unterdruck betrieben werden, ist S_E mit 1,5 einzusetzen.

13.5 Ermittlung der Temperaturen bei Abgasanlagen

Siehe Abschnitt 8.

Für den äußeren Wärmeübergangskoeffizienten ist anzusetzen:

- bei Abgasleitungen mit gleichsinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt $\alpha_a = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (äußerer Wärmeübergangskoeffizient = Wärmeübergang Abgasleitung zur Luft im Ringspalt), sofern die Abgasleitung den Schacht um nicht mehr als $3 \cdot D_h$ überragt
- bei Abgasleitungen mit gegensinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt $\alpha_a = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (äußerer Wärmeübergangskoeffizient = Wärmeübergang Abgasleitung zur Luft im Ringspalt), sofern die Abgasleitung den Schacht um nicht mehr als $3 \cdot D_h$ überragt
- bei Abgasleitungen oder Abgasleitungsabschnitten ohne durchströmten Ringspalt im Gebäude $\alpha_a = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, im Freien $\alpha_a = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Weisen Abgasleitungsabschnitte im Freien Ummantelungen oder Verkleidungen mit einer Schichtdicke von mindestens 1 cm auf, kann vereinfachend mit einem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_a = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gerechnet werden, wenn der Wärmedurchlaßwiderstand der Ummantelung oder Verkleidung vernachlässigt wird.

13.6 Ermittlung der Drücke bei Abgasanlagen

Siehe Abschnitt 10.

13.6.1 Abgasanlagen, die planmäßig mit Unterdruck betrieben werden

Die Berechnung der Drücke erfolgt für Abgasanlagen, die planmäßig mit Unterdruck betrieben werden, wie für feuchteunempfindliche Schornsteine.

13.6.2 Abgasanlagen, die planmäßig mit Überdruck betrieben werden

Der Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage $P_{ZÜ}$ ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Widerstandsdruck P_R und dem Ruhedruck P_H :

$$P_{ZÜ} = P_R - P_H \quad \text{in Pa} \quad (51)$$

Hierin bedeuten:

P_H	Ruhedruck im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	in Pa
P_R	Widerstandsdruck im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	in Pa

Der maximale nutzbare Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrecht angeordneten Abschnitt der Abgasanlage $P_{ZÜe}$ setzt sich wie folgt zusammen:

$$P_{ZÜe} = P_{WÜ} - P_L - P_{FV} \quad \text{in Pa} \quad (52)$$

Hierin bedeuten:

$P_{WÜ}$	zur Verfügung stehender Förderdruck (Überdruck) des Wärmeerzeugers	in Pa
P_L	notwendiger Förderdruck für die Zuluft	in Pa
P_{FV}	notwendiger Förderdruck für den waagerechten Abschnitt der Abgasanlage	in Pa

13.6.3 Abgasleitungen in Schächten mit gegensinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt

Bei Abgasleitungen, bei denen die Verbrennungsluft im Gegenstrom zum Abgas im Ringspalt angesaugt wird, kann vereinfachend die mittlere Temperatur der Luft im Ringspalt für die Ermittlung des notwendigen Förderdruckes für die Zuluft mit 15°C zugrunde gelegt werden, wobei der Ruhedruck in der Abgasleitung und im Ringspalt gleich Null zu setzen ist.

13.7 Funktionskontrolle und Grenzen bei der Berechnung von Abgasanlagen

Siehe Abschnitt 11.

Für Abgasanlagen ist wie für feuchteunempfindliche Schornsteine die zulässige Grenztemperatur des Abgases mit $t_g = 0^\circ\text{C}$ bzw. $T_g = 273,15 \text{ K}$ anzusetzen.

Der Nachweis der Temperaturbedingung ist nach Abschnitt 11.2 wie für feuchteunempfindliche Schornsteine zu führen. Die Überprüfung der Temperaturbedingung kann bei gleichsinnig zum Abgas durchströmtem Ringspalt entfallen, wenn die Länge des Schachtes im Freien und in nicht beheizten Räumen insgesamt 5 m nicht übersteigt.

13.7.1 Abgasanlagen, die planmäßig mit Unterdruck betrieben werden

Für Abgasanlagen, die planmäßig mit Unterdruck betrieben werden, ist der Nachweis für die Druckbedingung nach Abschnitt 11.1, und für die Grenzen nach Abschnitt 11.3 wie bei feuchteunempfindlichen Schornsteinen zu führen.

13.7.2 Abgasanlagen, die planmäßig mit Überdruck betrieben werden

Bei Abgasanlagen, die planmäßig mit Überdruck betrieben werden, ist der Nachweis der Druckbedingung durch den Vergleich des Überdruckes an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage $P_{ZÜ}$ mit dem an dieser Stelle maximal nutzbaren Überdruck $P_{ZÜe}$ zu führen mit der Bedingung

$$P_{ZÜ} \leq P_{ZÜe} \quad \text{in Pa} \quad (53)$$

Hierin bedeuten:

$P_{ZÜ}$	Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrecht angeordneten Abschnitt der Abgasanlage	in Pa
$P_{ZÜe}$	maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrecht angeordneten Abschnitt der Abgasanlage	in Pa

Die Überprüfung von Grenze 1, minimaler Unterdruck, entfällt für Abgasanlagen, die planmäßig mit Überdruck betrieben werden.

Für die Grenze 2, die minimale Strömungsgeschwindigkeit, gilt Abschnitt 11.3.2.

Für die Grenze 3, maximale Schlankheit, gilt die Gleichung

$$\left(\frac{H}{D_h} \right) \leq \left(\frac{H}{D_h} \right)_{\max} = 318 - 18750 \cdot r \quad (54)$$

Hierin bedeuten:

H	wirksame Schornsteinhöhe	in m
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser	in m
r	mittlere Rauigkeit der Innenwand	in m

Tabelle 1. Ausgangswerte für die Ermittlung des Abgasmassenstroms $\dot{m}$, der spezifischen Gaskonstante von Abgas R , der spezifischen Wärmekapazität c_p , des Wasserdampftaupunktes t_p , der Wärmeleitfähigkeit λ_A , der dynamischen Viskosität η_A des Abgases (c_p, λ_A, η_A bis 400 °C)

Brennstoff	H_u kWh/kg oder kWh/m ³	$V_{Atr,min}$ m ³ /kg oder m ³ /m ³	$V_{L,min}$ m ³ /kg oder m ³ /m ³	V_{H_2O} m ³ /kg oder m ³ /m ³	$\sigma(CO_2)_{max}$ %	f_{m1} g · % kWs	f_{m2} g kWs	f_R (ohne Kond.) 1/‰	f_R (mit 50 % Kond.) 1/‰	f_{c0} J kg · K · %	f_{c1} J kg · K ² · %	f_{c2} J kg · K ³ · %	f_{c3} 1/‰	f_W %
Koks	8,06	7,64	7,66	0,13	20,6	7,05	0,032	-0,0034		3,3	0,014	-0,000 014	0,0046	1240
Heizöl EL	11,86	10,52	11,26	1,49	15,4	4,92	0,046	-0,0001	-0,0018	13,0	0,014	-0,000 011	0,0093	111
Erdgas H	10,03	8,67	9,57	1,86	12,0	3,73	0,053	0,0033	0,0002	23,1	0,015	-0,000 007	0,0142	57
Erdgas L	9,03	7,87	8,63	1,70	11,8									
Stadtgas (Berlin)	4,31	3,55	3,86	1,05	11,8	3,51	0,065	0,0055	0,0013	31,1	0,017	-0,000 005	0,0185	41
Stadtgas (GSP Lch)	4,21	3,69	3,75	0,86	12,1	3,83	0,057	0,0036	0,0004	24,4	0,015	-0,000 007	0,0150	53
Flüssiggas	26,67	22,46	24,51	4,10	13,8	4,20	0,049	0,0014	-0,0010	17,6	0,015	-0,000 009	0,0115	77
Holz (23,1 % Feuchte ¹⁾)	3,70	3,44	3,45	0,80	20,5	6,93	0,077	0,0001		15,4	0,016	-0,000 011	0,0111	91

¹⁾ 23,1 % Feuchte entspricht 30 % Feuchte bezogen auf Trockengewicht.

Näherungsgleichungen:

$$\dot{m} = \left(\frac{f_{m1}}{\sigma(CO_2)} + f_{m2} \right) \cdot Q_F \quad \text{in g/s}$$

$$Q_F = \frac{100}{\eta_W} \cdot Q \quad \text{in kW}$$

$$R = R_L (1 + f_R \cdot \sigma(CO_2)) \quad \text{in J/(kg · K)}$$

$$c_p = \frac{1011 + 0,05 \cdot t_m + 0,0003 \cdot t_m^2 + (f_{c0} + f_{c1} \cdot t_m + f_{c2} \cdot t_m^2) \cdot \sigma(CO_2)}{1 + f_{c3} \cdot \sigma(CO_2)} \quad \text{in J/(kg · K)}$$

$$\sigma(H_2O) = \frac{100}{1 + \frac{f_W}{\sigma(CO_2)}} + 1,1 \quad \text{in %}$$

$$p_D = \frac{\sigma(H_2O)}{100} \cdot p_L \quad \text{in Pa}$$

$$t_p = \frac{4077,9}{23,6448 - \ln p_D} - 236,67 \quad \text{in °C}$$

$$\lambda_A = 0,0223 + 0,000065 \cdot t_m \quad \text{in W/(m · K)}$$

$$\eta_A = 15 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-9} \cdot t_m - 20 \cdot 10^{-12} \cdot t_m^2 \quad \text{in Ns/m}^2$$

In den Gleichungen bedeuten:

$\dot{m}$	Abgasmassenstrom	in g/s
$\sigma(CO_2)$	Kohlendioxidgehalt des trockenen Abgases	in %
Q_F	Feuerungswärmeleistung des Wärmeerzeugers	in kW
Q	Wärmeleistung des Wärmeerzeugers	in kW
η_W	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers	in %
R	Gaskonstante des Abgases	in J/(kg · K)
R_L	Gaskonstante der Luft = 288 J/(kg · K)	
c_p	spezifische Wärmekapazität des Abgases	in J/(kg · K)
t_m	mittlere Abgastemperatur	in °C
$\sigma(H_2O)$	Wasserdampfgehalt des Abgases	in %
p_D	Wasserdampf-Teildruck	in Pa
p_L	Außenluftdruck	in Pa
t_p	Taupunkttemperatur	in °C
λ_A	Wärmeleitfähigkeit des Abgases	in W/(m · K)
η_A	dynamische Viskosität des Abgases	in Ns/m ²

Tabelle 2a. **Anhaltswerte für Heizkessel nach DIN 4702 Teil 1 und Teil 4**
(die graphische Darstellung ist mit Bild 7 gegeben)

Brennstoff	Gleichungen für P_W , η_W und $\sigma(\text{CO}_2)$
Koks, Steinkohle, Braunkohlebriketts	$P_W = \begin{cases} 15 \cdot \lg Q_N & \text{in Pa für } Q_N \leq 100 \text{ kW} \\ -70 + 50 \cdot \lg Q_N & \text{in Pa für } 100 \text{ kW} < Q_N \leq 1000 \text{ kW} \\ 80 \text{ Pa} & \text{für } Q_N > 1000 \text{ kW} \end{cases}$
	$\eta_W = 68,65 + 4,35 \cdot \lg Q_N \text{ in \% für } Q_N \leq 2000 \text{ kW}$
	$\sigma(\text{CO}_2) = \begin{cases} 9,5 \% & \text{für } Q_N \leq 100 \text{ kW} \\ 4,1 + 2,7 \cdot \lg Q_N & \text{in \% für } 100 \text{ kW} < Q_N \leq 2000 \text{ kW} \end{cases}$
Holz (23,1 % Feuchte)	$P_W = \begin{cases} 15 \cdot \lg Q_N & \text{in Pa für } Q_N \leq 50 \text{ kW} \\ 27 + 13 \cdot \lg Q_N & \text{in Pa für Spezialkessel mit } 10 \text{ kW} < Q_N \leq 350 \text{ kW} \end{cases}$
	$\eta_W = 51,6 + 8,4 \cdot \lg Q_N \text{ in \% für } Q_N \leq 1000 \text{ kW}$
	$\sigma(\text{CO}_2) = \begin{cases} 8,0 \% & \text{für } Q_N \leq 10 \text{ kW} \\ 6,0 + 2,0 \cdot \lg Q_N & \text{in \% für } 10 \text{ kW} < Q_N \leq 1000 \text{ kW} \end{cases}$
Öl und Gas (mit und ohne Gebläsebrenner)	$P_W = \begin{cases} 15 \cdot \lg Q_N & \text{in Pa für } Q_N \leq 100 \text{ kW} \\ -47 + 38,5 \cdot \lg Q_N & \text{in Pa für } Q_N > 100 \text{ kW} \end{cases}$
	$\eta_W = \begin{cases} 85,0 + 1,0 \cdot \lg Q_N & \text{in \% für } Q_N \leq 1000 \text{ kW} \\ 88,0 \% & \text{für } Q_N > 1000 \text{ kW} \end{cases}$
	$\sigma(\text{CO}_2) = \begin{cases} \frac{f_{x1}}{1 - f_{x2} \cdot \lg Q_N} & \text{in \% für } Q_N \leq 100 \text{ kW} \\ f_{x3} & \text{in \% für } Q_N > 100 \text{ kW} \end{cases}$

Tabelle 2b. **Werte für f_{x1} , f_{x2} , f_{x3} zur Ermittlung von $\sigma(\text{CO}_2)$ bei Öl- und Gasbrennern**

Brennstoff	Gebläsebrenner			Brenner ohne Gebläse *)		
	f_{x1}	f_{x2}	f_{x3}	f_{x1}	f_{x2}	f_{x3}
Heizöl EL	11,2	0,076	13,2	—	—	—
Erdgas	8,6	0,078	10,2	5,1	0,075	6,0
Stadtgas (Berlin)	8,5	0,079	10,1	4,9	0,078	5,8
Stadtgas (GSP Lch)	8,9	0,076	10,5	5,2	0,074	6,1
Flüssiggas	10,0	0,080	11,9	5,9	0,079	7,0

*) Werte hinter der Strömungssicherung (für die Auslegung)

Tabelle 3. **Mittlere Rauigkeit r der Innenschale einiger Baustoffe**

Werkstoff der Innenschale	Rauigkeit r in m
geschweißte Stahlrohre	0,001
Aluminium	0,001
Glas, Kunststoff	0,001
Schamotteformstücke	0,0015
Schamotteformsteine	0,002
Blechkanäle gefalzt	0,002
Betonformstücke	0,003
gemauerte Kanäle	0,005
gewellte Rohre	0,005

Diese Werte können bei unsachgemäßer Ausführung des Abgaskanals bzw. des Schornsteins und bei Verschmutzung größer werden. Geringere Rauigkeitsbeiwerte dürfen angesetzt werden, wenn in der Zulassung des Baustoffes als Schornsteinbauteil entsprechende Werte aufgenommen wurden.

Tabelle 4. Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c einiger Schornsteinbaustoffe

	ρ kg/m ³	c kJ/(kg · K)	t °C	λ W/(m · K)
Aluminium	2700			200
Stahl	7850	0,50	10	58
nichtrostende Stähle			10	15
nach DIN 17 440, Werkstoff Nr 1.4301 oder Nr 1.4571			100	16
			200	17
Mauerwerk	1800	0,92	10	0,81
hochfeste Ziegel und hochfeste Klinker	2000			0,96
nach DIN 105 Teil 3	2200			1,2
Vollziegel, Hochlochziegel	1200		10	0,50
nach DIN 105 Teil 1	1400			0,58
	1600			0,68
	1800			0,81
Kalksandsteine	1000		10	0,50
nach DIN 106 Teil 1	1200			0,56
	1400			0,70
	1600			0,79
	1800			0,99
Leichtbeton-Vollsteine	800		10	0,40
nach DIN 18 152	1000			0,46
	1200			0,54
	1400			0,63
	1600			0,74
	1800			0,87
Leichtbeton-Hohlblocksteine	1000		10	0,49
nach DIN 18 151	1200			0,60
	1400			0,73
Normalbeton nach DIN 1045	2400	0,88	20	2,1
Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge nach DIN 4219 Teil 1 und Teil 2 mit porigen Zuschlägen nach DIN 4226 Teil 2	1200		10	0,62
	1400			0,79
	1600			1,0
	1800			1,3
Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge z.B. nach DIN 4232 und porigen Zuschlägen nach DIN 4226 Teil 2 ohne Quarzzuschlag	1200		10	0,46
	1400			0,57
	1600			0,75
	1800			0,92
Putz, Kalkmörtel, Kalkzementmörtel	1800		10	0,87
Schamotte	2000	0,92	20	1,0
			200	1,1
			500	1,2
Mineralfaser	100	0,75	20	0,035
			100	0,045
			200	0,065
Glas	2200	0,80	20	1,07
			100	1,20
			200	1,37
PVDF (Polyvinylidenfluorid)	1800	0,96	20 bis 150	0,19
PP (Polypropylen)	900	1,7	—	0,22

Tabelle 5. **Wärmedurchlaßwiderstand von abgeschlossenen Luftschichten, abhängig von der Schichtdicke d und der Oberflächentemperatur der wärmeabgebenden Wand (konzentrischer Ringspalt, vertikal angeordnet)**

	[1/ λ] _n in m ² K/W				
d [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
40 °C	0,123	0,147	0,153	0,152	0,150
100 °C	0,087	0,101	0,101	0,100	0,099
150 °C	0,065	0,075	0,075	0,074	0,074
200 °C	0,050	0,055	0,055	0,055	0,054

Anmerkung: Die fiktive Wärmeleitfähigkeit λ_n von abgeschlossenen Luftschichten kann aus den Werten der Tabelle 4 mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\lambda_n = y \frac{D_{h,n}}{2 \left(\frac{1}{\lambda} \right)_n} \cdot \ln \left(\frac{D_h + 2 d_n}{D_{h,n}} \right) \quad \text{in W/(m} \cdot \text{K)}$$

Hierin bedeuten:

y	Formbeiwert (siehe Abschnitt 6.2)	—
D_h	innerer hydraulischer Durchmesser der Luftschicht	in m
$\left(\frac{1}{\lambda} \right)_n$	Wärmedurchlaßwiderstand der Luftschicht	in (m ² · K)/W
d_n	Schichtdicke der Wand	in m

Tabelle 6. Außenluft- und Umgebungslufttemperaturen für den Druck- und Temperaturnachweis

Anordnung des Schornsteins			Druck	Bedingungen Temperatur
Schornstein im Gebäude	t_L	°C	+ 15	$t_g = t_p$ —
	t_u	°C	+ 15	+ 15 ¹⁾ / + 20 bis ± 0 ²⁾
	t_{uo}	°C	—	0
Schornstein im Gebäude mit Nebenluftvorrichtung	t_L	°C	+ 15 / 0 ³⁾	$t_g = t_p$ —
	t_u	°C	—	+ 15 ¹⁾ / + 20 bis ± 0 ²⁾
	t_{uo}	°C	—	0
Schornstein freistehend	t_L	°C	+ 15 / - 15 ³⁾	$t_g = t_p$ —
	t_u	°C	+ 15	- 15
	t_{uo}	°C	—	- 15
feuchteunempfindlicher Schornstein	t_L	°C	+ 15 / - 15 ³⁾	$t_g = 0\text{ °C}$ —
	t_u	°C	+ 15	+ 15 ¹⁾ / + 20 bis - 15 ²⁾
	t_{uo}	°C	—	- 15
Abgasanlage für Abgase mit niedrigen Temperaturen a) Gleichstrom	t_L	°C	+ 15	$t_g = 0\text{ °C}$ —
	t_u	°C	+ 15	+ 15 ⁴⁾ / + 20 bis - 15 ⁶⁾
	t_{uo}	°C	—	- 15
b) Gegenstrom	t_L	°C	+ 15	$t_g = 0\text{ °C}$ 0 ⁵⁾ bis - 15 ⁶⁾
	t_u	°C	+ 15	- 15
	t_{uo}	°C	—	- 15
c) außen angebracht	t_L	°C	+ 15	$t_g = 0\text{ °C}$ —
	t_u	°C	+ 15	- 15
	t_{uo}	°C	—	- 15
t_L = Außenlufttemperatur t_u = Umgebungslufttemperatur t_{uo} = Umgebungslufttemperatur an der Mündung t_g = Grenztemperatur t_p = Taupunkttemperatur				
¹⁾ Maximal ¼ der wirksamen Schornsteinhöhe oder der entsprechenden Schornsteinaußenflächen im Freien oder in nicht beheizten Räumen. ²⁾ Mehr als ¼ der wirksamen Schornsteinhöhe oder der entsprechenden Schornsteinaußenflächen im Freien oder in nicht beheizten Räumen, Umgebungstemperatur entsprechend den Flächenanteilen mitteln oder den Schornstein abschnittsweise rechnen. ³⁾ Für die Berechnung des Nebenluftstromes ⁴⁾ Die Überprüfung der Temperaturbedingung kann entfallen, wenn die Höhe des Schachtes im Freien und in nicht beheizten Räumen insgesamt 5 m nicht übersteigt. ⁵⁾ Für eine Höhe des Schachtes im Freien und in nicht beheizten Räumen von nicht mehr als 5 m. ⁶⁾ Für eine Höhe des Schachtes im Freien und in nicht beheizten Räumen von mehr als 5 m.				

Tabelle 7. Einzelwiderstandszahlen für einige Formen

Interpolationen zwischen den angegebenen Parametern sind zulässig.

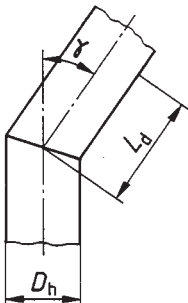
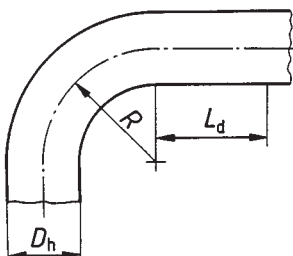
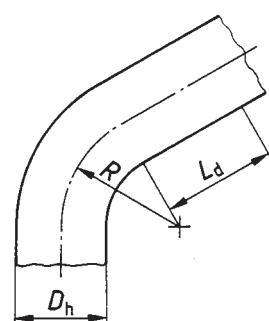
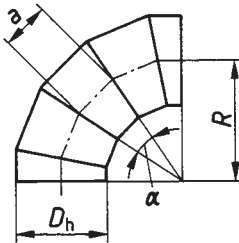
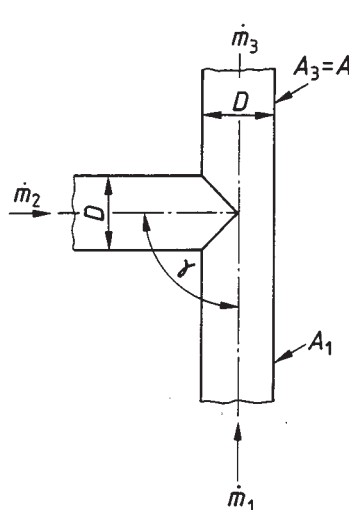
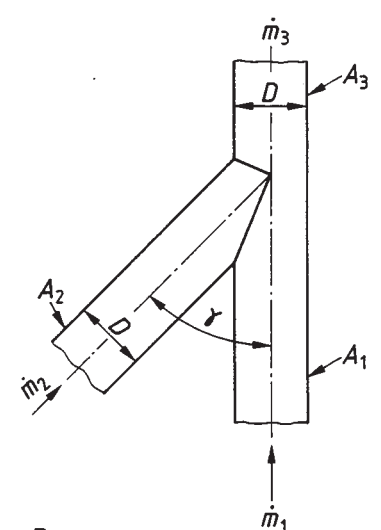
Lfd. Nr	Formen	geometrische Abmessungen	ξ -Werte		
1		Winkel γ in ° 10 30 45 60 90	$L_d/D_h \geq 30$		$30 > L_d/D_h \geq 2$
			0,1	0,1	
			0,2	0,3	
			0,3	0,4	
2		$R : D_h$ 0,5 0,75 1,0 1,5 2,0	90°-Bogen		
			$L_d/D_h \geq 30$	$30 > L_d/D_h \geq 2$	
			1,0	1,2	
			0,4	0,5	
3		$R : D_h$ 0,5 0,75 1,0 1,5 2,0	60°-Bogen		
			$L_d/D_h \geq 30$	$30 > L_d/D_h \geq 2$	
			0,6	1,0	
			0,3	0,4	
4	Darstellung: $\alpha = 22,5^\circ$ (4-Segmentbogen) 	$a = 2 \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ $a : D_h$ 1,0 1,5 2,0 3,0 5,0	90°-Umlenkung Anzahl der Segmente		
			$2 \times 45^\circ$	$3 \times 30^\circ$	$4 \times 22,5^\circ$
			0,4	0,25	0,17
			0,3	0,18	0,13

Tabelle 7. (Fortsetzung)

Lfd. Nr	Formen	geometrische Abmessungen	ζ -Werte																										
5	Abzweige   Bezug: w_3	Winkel $\gamma = 90^\circ$ $\dot{m}_2 : \dot{m}_3$ $\frac{A_3}{A_2} = 1,0$ <table><tr><td>0,0</td><td>0,0</td></tr><tr><td>0,2</td><td>-0,38</td></tr><tr><td>0,4</td><td>0,10</td></tr><tr><td>0,6</td><td>0,53</td></tr><tr><td>0,8</td><td>0,89</td></tr><tr><td>1,0</td><td>1,20</td></tr></table>	0,0	0,0	0,2	-0,38	0,4	0,10	0,6	0,53	0,8	0,89	1,0	1,20	<table><tr><th>ζ_{2-3}</th><th>ζ_{1-3}</th></tr><tr><td>-0,92</td><td>0,03</td></tr><tr><td>-0,38</td><td>0,20</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,35</td></tr><tr><td>0,53</td><td>0,47</td></tr><tr><td>0,89</td><td>0,56</td></tr><tr><td>1,20</td><td>0,62</td></tr></table>	ζ_{2-3}	ζ_{1-3}	-0,92	0,03	-0,38	0,20	0,10	0,35	0,53	0,47	0,89	0,56	1,20	0,62
		0,0	0,0																										
0,2	-0,38																												
0,4	0,10																												
0,6	0,53																												
0,8	0,89																												
1,0	1,20																												
ζ_{2-3}	ζ_{1-3}																												
-0,92	0,03																												
-0,38	0,20																												
0,10	0,35																												
0,53	0,47																												
0,89	0,56																												
1,20	0,62																												
Winkel $\gamma = 45^\circ$ $\dot{m}_2 : \dot{m}_3$ $\frac{A_3}{A_2} = 1,0$ <table><tr><td>0,0</td><td>-0,92</td></tr><tr><td>0,2</td><td>-0,42</td></tr><tr><td>0,4</td><td>-0,04</td></tr><tr><td>0,6</td><td>0,22</td></tr><tr><td>0,8</td><td>0,35</td></tr><tr><td>1,0</td><td>0,35</td></tr></table>	0,0	-0,92	0,2	-0,42	0,4	-0,04	0,6	0,22	0,8	0,35	1,0	0,35	<table><tr><th>ζ_{2-3}</th><th>ζ_{1-3}</th></tr><tr><td>-0,92</td><td>0,03</td></tr><tr><td>-0,42</td><td>0,16</td></tr><tr><td>-0,04</td><td>0,17</td></tr><tr><td>0,22</td><td>0,06</td></tr><tr><td>0,35</td><td>-0,18</td></tr><tr><td>0,35</td><td>-0,53</td></tr></table>	ζ_{2-3}	ζ_{1-3}	-0,92	0,03	-0,42	0,16	-0,04	0,17	0,22	0,06	0,35	-0,18	0,35	-0,53		
0,0	-0,92																												
0,2	-0,42																												
0,4	-0,04																												
0,6	0,22																												
0,8	0,35																												
1,0	0,35																												
ζ_{2-3}	ζ_{1-3}																												
-0,92	0,03																												
-0,42	0,16																												
-0,04	0,17																												
0,22	0,06																												
0,35	-0,18																												
0,35	-0,53																												

Formel zur Berechnung der Einzelwiderstandszahlen bei Zusammenführungen*):

$$\zeta_{2-3} = -0,92 \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 - \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 \left[1,2 \left(\frac{A_3}{A_2} \cos \gamma - 1\right) + 0,8 \left(1 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^2\right) - \left(1 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{A_3}{A_2} \cos \gamma\right] + \left(2 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right);$$
$$\zeta_{1-3} = 0,03 \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 - \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 \left[1 + 1,62 \left(\frac{A_3}{A_2} \cos \gamma - 1\right) - 0,38 \left(1 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right)\right] + \left(2 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right);$$

mit $\frac{A_3}{A_2} \geq 1$; $0 \leq \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} \leq 1,0$; $0^\circ < \gamma \leq 90^\circ$

Für $\frac{A_3}{A_2} < 1$ kann der Einzelwiderstand der Zusammenführung als Summe der Einzelwiderstände einer Querschnittsverengung (siehe lfd. Nr 6 bzw. 8) und einer Zusammenführung $\frac{A_3}{A_2} = 1$ bestimmt werden.

*) nach Gardel

Tabelle 7. (Fortsetzung)

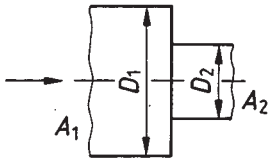
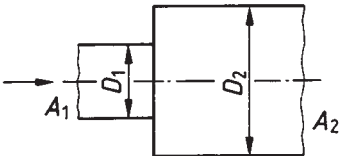
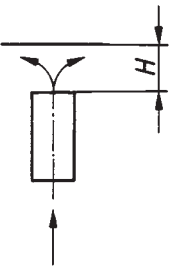
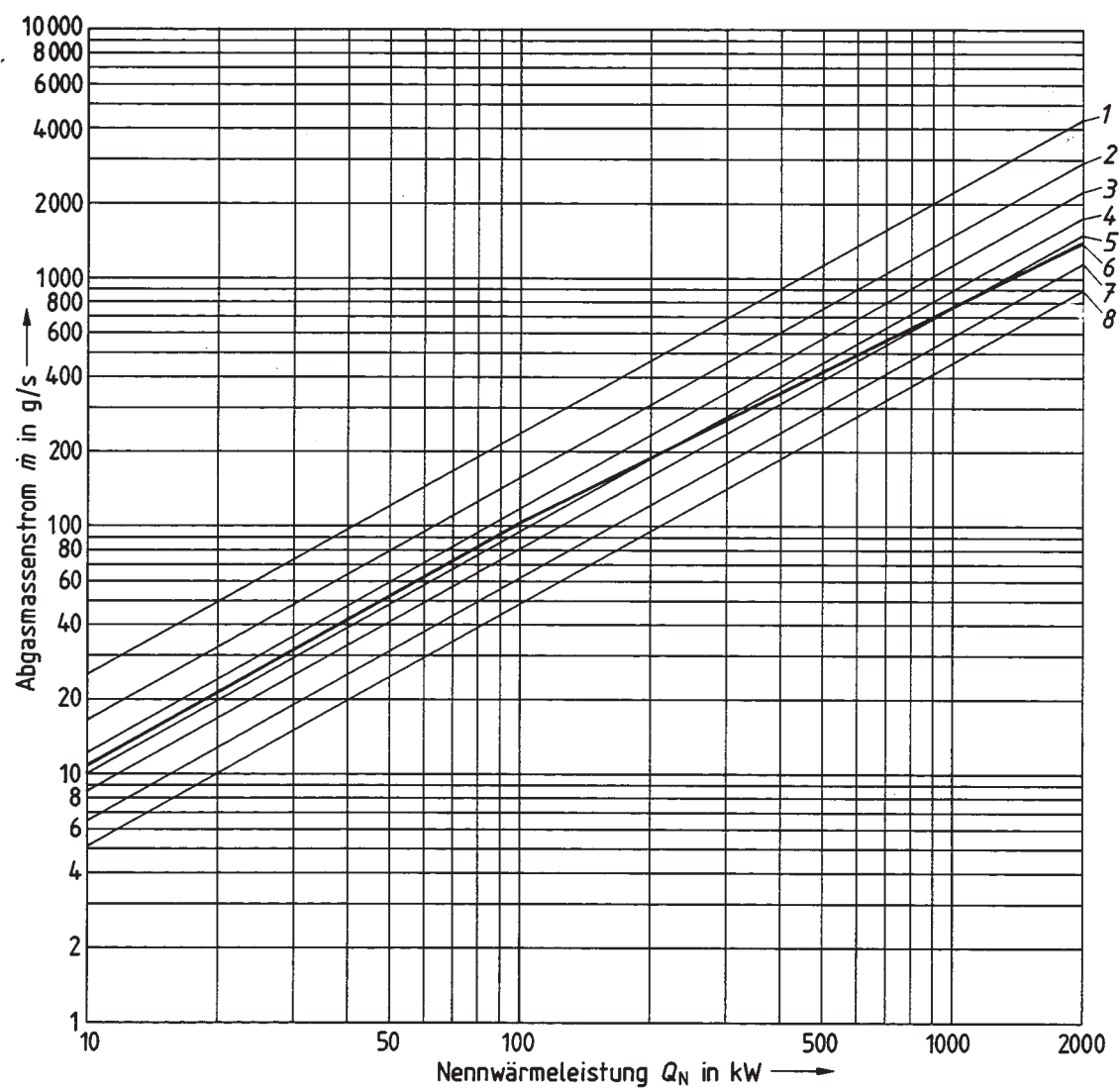
Lfd. Nr	Formen	geometrische Abmessungen	ζ -Werte		
6	 Bezug: w_2	$A_2 : A_1$ 0,4 0,6 0,8	0,33 0,25 0,15 bei abgerundeter Einlaufkante $\zeta = 0$		
7	 Bezug: w_1	$A_1 : A_2$ 0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	1,0 0,7 0,4 0,2 0,1 0		
8	 Bezug: w_2	$A_2 : A_1$ 0,10 0,25 0,45 1,0	$\gamma = 30^\circ$ 0,05 0,04 0,05 0,0	$\gamma = 60^\circ$ 0,08 0,07 0,07 0,0	$\gamma = 90^\circ$ 0,19 0,17 0,14 0,0
9		$H : D_h$ 0,5 1,0	1,5 1,0		

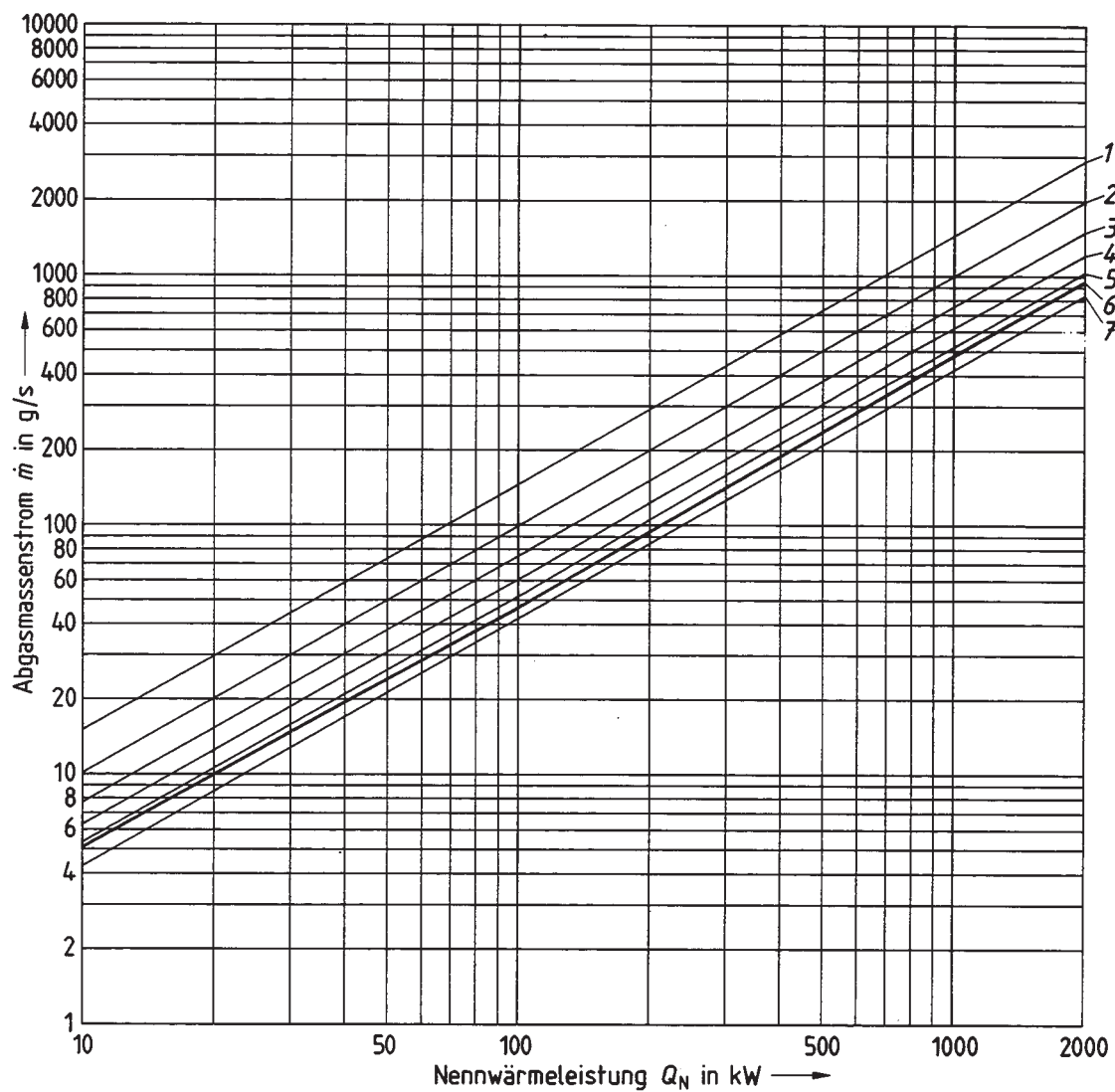
Tabelle 8. Kennwerte von Nebenluftvorrichtungen nach DIN 4795

Gruppe der Nebenluftvorrichtung	a_1 (Pa · s)/kg	a_2 Pa · (s/kg) ²
1	400	120 000
2	200	30 000
3	140	11 400
4	97	5 000
5	74	2 800
6	48	1 260



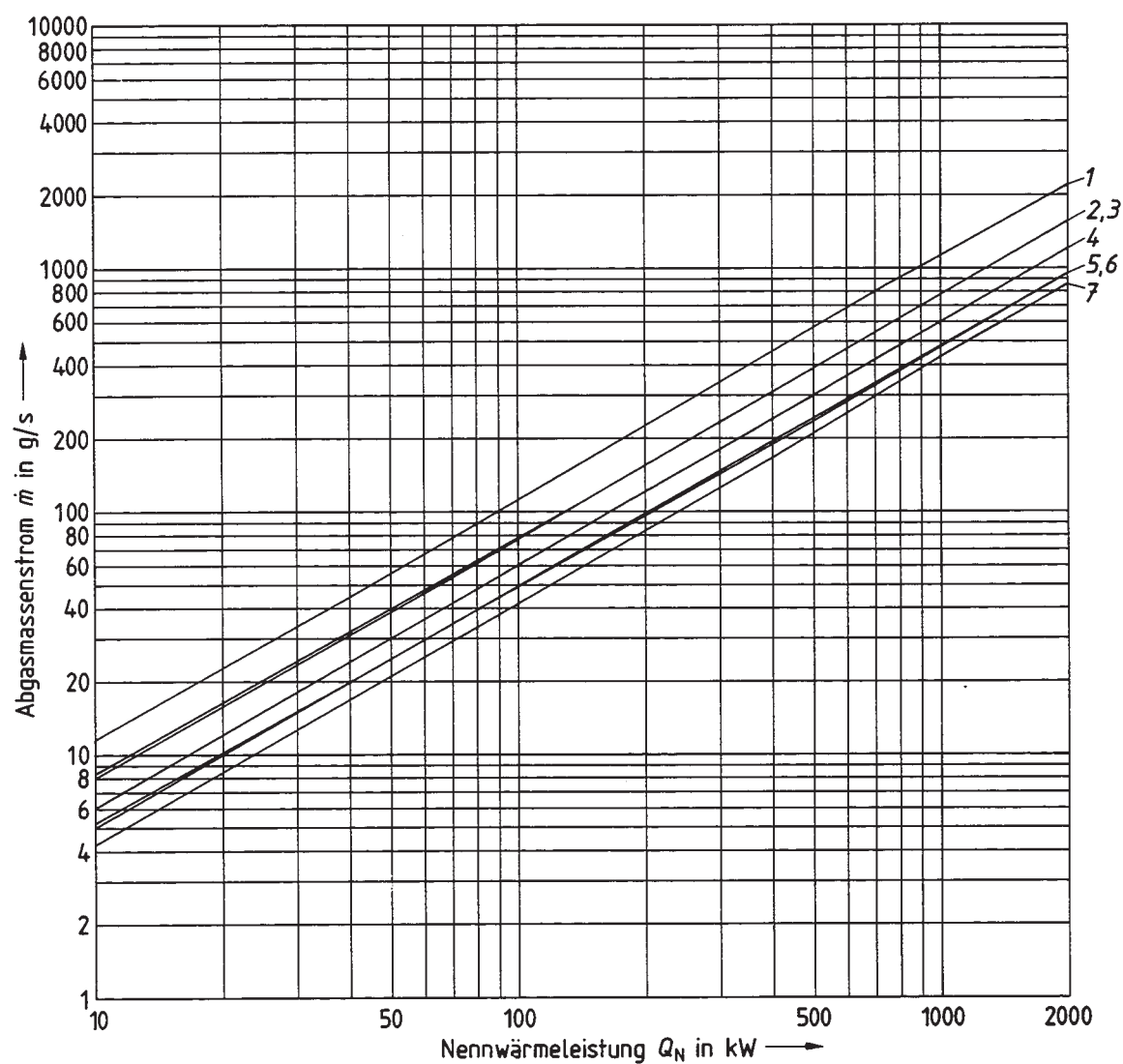
$\sigma(\text{CO}_2)$ in %	4	6	8	10	12	Heizkessel nach DIN 4702 Teil 1	16	20
Nr der Kurve in Bild 1	1	2	3	4	5	6	7	8

Bild 1. Abgasmassenstrom $\dot{m}$ für Koks (Näherungsgleichungen siehe Tabellen 1 und 2)



$\sigma(\text{CO}_2)$ in %	4	6	8	10	12	Heizkessel nach DIN 4702 Teil 1	15,4
Nr der Kurve in Bild 2	1	2	3	4	5	6	7

Bild 2. Abgasmassenstrom $\dot{m}$ für Heizöl EL (Näherungsgleichungen siehe Tabellen 1 und 2)



$\sigma(\text{CO}_2)$ in %	4	6	atmosphärische Brenner	8	10	Gebläse-brenner	12
Nr der Kurve in Bild 3	1	2	3	4	5	6	7

Bild 3. Abgasmassenstrom $\dot{m}$ für Erdgas (Näherungsgleichungen siehe Tabellen 1 und 2); gilt auch für Gasart GSP Lch