

DIN EN 13384-1

ICS 91.060.40

Ersatz für
DIN EN 13384-1:2003-03

**Abgasanlagen –
Wärme- und strömungstechnische Berechnungsverfahren –
Teil 1: Abgasanlagen mit einer Feuerstätte;
Deutsche Fassung EN 13384-1:2002 + A1:2005**

Chimneys –

Thermal and fluid dynamic calculation methods –

Part 1: Chimneys serving one appliance;

German version EN 13384-1:2002 + A1:2005

Conduits de fumée –

Méthode de calcul thermo-aéraulique –

Partie 1: Conduits de fumée ne desservant qu'un seul appareil;

Version allemande EN 13384-1:2002 + A1:2005

Gesamtumfang 94 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN
Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik (NHRS) im DIN

Nationales Vorwort

Dieses Dokument EN 13384-1:2002 einschließlich EN 13384-1:2002/A1:2005 wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 166 „Abgasanlagen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom UNI (Italien) gehalten wird. Das zuständige deutsche Spiegelgremium ist der Arbeitsausschuss 1.06 „Schornsteinberechnung“ im Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Diese Norm enthält Festlegungen für die feuerungstechnische Bemessung von Querschnitten für Abgasanlagen. Der Begriff „Abgasanlagen“ ist ein Oberbegriff zu dem bisher in den nationalen Normen der Reihe DIN 4705 verwendeten Begriff „Schornstein“. Nach den derzeit gültigen Landesbauordnungen der Bundesländer ist eine Abgasanlage Teil einer Feuerungsanlage, welche sowohl die Feuerstätte und die Abgasanlage erfasst. Der Begriff „Abgasanlage“ umfasst als Oberbegriff alle Anlagen zum Abführen von Abgasen, Anlagen mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Schornsteine, Abgasleitungen und Luft-Abgas-Systeme sowie Verbindungsstücke usw. Um die nationale Übereinstimmung mit den Landesbauordnungen der Bundesländer herzustellen, wurde aus den genannten Gründen der Begriff „Schornstein“ nicht mehr verwendet, sondern der übergeordnete Begriff „Abgasanlage“.

Die Änderung A1 zu EN 13384-1:2002 beinhaltet ein Berechnungsverfahren für Luft-Abgasanlagen (LAS). Damit ist es möglich die Querschnitte der immer häufiger eingesetzten Luft-Abgasanlagen europaweit einheitlich zu berechnen.

Die Änderungen sind an der linken Seite mit einem senkrechten Strich gekennzeichnet.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 13384-1:2003-03 wurden folgende Änderungen aufgenommen:

- a) ein Berechnungsverfahren für Luft-Abgasanlagen aufgenommen;
- b) redaktionelle Fehler berichtigt.

Frühere Ausgaben

DIN EN 13384-1: 2003-03
DIN 4705: 1944-04
DIN 4705-1: 1979-09, 1993-10
DIN 4705-2: 1979-09
DIN 4705-10: 1984-12

Deutsche Fassung

Abgasanlagen — Wärme- und strömungstechnische Berechnungsverfahren — Teil 1: Abgasanlagen mit einer Feuerstätte

Chimneys —
Thermal and fluid dynamic calculation methods —
Part 1: Chimneys serving one appliance

Conduits de fumée —
Méthode de calcul thermo-aéraulique —
Partie 1: Conduits de fumée ne desservant qu'un seul
appareil

Diese Europäische Norm wurde von CEN am 23. Oktober 2002 angenommen.

Die Änderung A1 wurde von CEN am 19. September 2005 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Vorwort zur Änderung A1	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Formelzeichen, Benennungen, Einheiten	8
5 Berechnungsverfahren für Nicht-LAS-Abgasanlagen	12
5.1 Allgemeine Grundsätze	12
5.2 Druckbedingung	12
5.3 Temperaturbedingung	13
5.4 Berechnungsgang	14
5.5 Charakteristische Abgaswerte für die Feuerstätte	14
5.6 Bauartkennwerte	16
5.7 Grundwerte für die Berechnung	17
5.8 Ermittlung der Temperaturen	21
5.9 Ermittlung der Dichte des Abgases und der Abgasgeschwindigkeit	24
5.10 Berechnung der Drücke	24
5.11 Notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (P_{Ze}) und maximaler nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (P_{Zoe})	28
5.12 Berechnung der Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage (T_{iob})	31
6 Nebenluft für Unterdruck-Abgasanlagen	32
6.1 Allgemeines	32
6.2 Berechnungsgang	33
6.3 Grundwerte für die Nebenluftberechnung	33
6.4 Druckberechnung	34
6.5 Temperaturbedingung für die Nebenluft	37
7 Berechnungsverfahren für Luft-Abgasanlagen	37
7.1 Allgemeine Grundsätze	37
7.2 Druckbedingung	38
7.3 Temperaturbedingung	39
7.4 Berechnungsgang	39
7.5 Abgaskennwerte der Feuerstätte	39
7.6 Kennwerte für die Berechnung	39
7.7 Grundwerte der Berechnung	40
7.8 Ermittlung der Temperaturwerte	41
7.9 Ermittlung der Dichte und der Geschwindigkeit	61
7.10 Ermittlung der Drücke	62
7.11 Notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage (P_{Ze}) und maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Teil der Abgasanlage (P_{Zoe})	63
7.12 Ermittlung der Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage (T_{iob})	66
8 Berücksichtigung der Kondensationswärme des Wasserdampfes im Abgas	67
8.1 Allgemeines	67
8.2 Beginn der Kondensation	67
8.3 Berechnung der Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes ($j \geq N_{segK}$) der Abgasanlage mit Kondensation	70
Anhang A (informativ) Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes	76
Anhang B (informativ) Tabellen	77
Anhang C (informativ) Einfluss der Mündung von Abgasanlagen auf benachbarte Gebäude	89
Anhang D (informativ) Grenzkurven für die Klassifikation der Nebenluftvorrichtungen	90
Anhang E (informativ) Bestimmung der Gaskonstante R unter Berücksichtigung von Kondensation	91
Literaturhinweise	92

Vorwort

Dieses Dokument (EN 13384-1:2002) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 166 „Abgasanlagen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom UNI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juni 2003, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juni 2003 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EG-Richtlinien.

Die Anhänge A, B, C, D, und E sind informativ.

Diese Europäische Normenreihe „Abgasanlagen — Wärme- und strömungstechnische Berechnungsverfahren“ besteht aus zwei Teilen:

- *Teil 1: Abgasanlagen mit einer Feuerstätte;*
- *Teil 2: Abgasanlagen mit mehreren Feuerstättenanschlüssen und einem Anschluss mit mehreren Feuerstätten.*

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechische Republik und das Vereinigte Königreich.

Vorwort zur Änderung A1

Diese Europäische Norm (EN 13384-1:2002/A1:2005) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 166 „Abgasanlagen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom UNI gehalten wird.

Diese Änderung zur Europäischen Norm EN 13384-1:2002 muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis April 2006, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis April 2006 zurückgezogen werden.

Die folgende Änderung zu EN 13384-1 ist ein zusätzliches besonderes Berechnungsverfahren für Luft-Abgasanlagen.

— *Im Vorwort:*

Im 5. Absatz ist zu ändern: ... besteht aus drei (anstelle von zwei) Teilen.

EN 13384-3 ist hinzuzufügen:

Teil 3: Verfahren für die Entwicklung von Diagrammen und Tabellen für Abgasanlagen mit einer Feuerstätte

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm legt wärme- und strömungstechnische Berechnungsverfahren von Abgasanlagen mit einer Feuerstätte fest.

Diese Norm gilt sowohl für Unterdruck- als auch für Überdruckanlagen in feuchter und trockener Betriebsweise. Sie gilt für Abgasanlagen von Feuerstätten mit Brennstoffen, deren Abgaskennwerte, die für die Berechnung benötigt werden, bekannt sind.

Das Berechnungsverfahren dieser Norm gilt für Abgasanlagen mit einem Anschluss für eine Feuerstätte. Das Berechnungsverfahren nach Teil 2 dieser Europäischen Norm gilt dagegen für Abgasanlagen mit mehreren Anschlüssen und für einen Anschluss mit mehreren Feuerstätten.

Teil 3 beschreibt Verfahren zur Entwicklung von Diagrammen und Tabellen für Abgasanlagen mit einer Feuerstätte.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 1443, *Abgasanlagen — Allgemeine Anforderungen*.

EN 1856-1, *Abgasanlagen — Anforderungen an Metallabgasanlagen – Teil 1: Bauteile für Systemabgasanlagen*.

EN 1859, *Abgasanlagen — Metall-Abgasanlagen — Prüfverfahren*.

EN 13502, *Abgasanlagen — Keramik-Aufsätze — Anforderungen und Prüfverfahren*.

CR 1749, *Europäisches Schema für die Einteilung von Gasgeräten nach der Art der Abgasabführung (Typen)*.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Europäischen Norm gelten die in EN 1443 angegebenen und die folgenden Begriffe.

3.1

Wärmeleistung

Q

die an den Wärmetauscher übertragene Wärmemenge in der Zeiteinheit

3.1.1

Nennwärmeleistung

Q_N

vom Hersteller abhängig von der Art des Brennstoffes festgelegte Dauerleistung der Feuerstätte

3.1.2

Wärmeleistungsbereich

vom Hersteller, unterhalb der Nennwärmeleistung festgelegter Bereich, in dem die Feuerstätte eingesetzt werden kann

3.2

Feuerungswärmeleistung

Q_F

der Feuerstätte in der Zeiteinheit vom Brennstoff zugeführte Wärmemenge, basierend auf den Netto-Heizwert H_u

3.3

Wirkungsgrad der Feuerstätte

η_w
Verhältnis der abgegebenen nutzbaren Wärmeleistung (Q) der Feuerstätte zur Feuerungswärmeleistung (Q_F)

3.4

Abgasmassenstrom

\dot{m}
Masse der Abgase, welche die Feuerstätte durch das Verbindungsstück in der Zeiteinheit verlassen

3.5

wirksame Schornsteinhöhe

H
Höhenunterschied zwischen der Achse der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage und der Ausmündung

3.6

wirksame Höhe des Verbindungsstückes

H_V
Höhenunterschied zwischen der Achse des Abgasstutzens der Feuerstätte und der Achse der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage

Bei offenen Kaminen ist H_V der Höhenunterschied zwischen der Oberkante der Feuerraumöffnung und der Achse der Abgaseinführung in die Abgasanlage

3.7

Zug

positiver Wert des Unterdruckes in der Abgasanlage

3.8

Ruhedruck

P_H
Druckdifferenz durch das unterschiedliche Dichten der Luftsäule im Freien und der Abgassäule im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage

3.9

Widerstandsdruck des senkrechten Abschnitts der Abgasanlage

P_R
Druck, der erforderlich ist, um die Strömungswiderstände für den Abgasmassenstrom im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage zu überwinden

3.10

Winddruck

P_L
Druck, der durch Wind auf die Abgasanlage einwirkt

3.11

Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage

P_Z
Differenz zwischen dem Ruhedruck in der Höhe der Achse der Abgaseinführung und dem Widerstandsdruck des senkrechten Abschnitts der Abgasanlage in gleicher Höhe

3.12

notwendiger Förderdruck für die Feuerstätte

P_W
Differenz zwischen dem Luftdruck im Aufstellungsraum der Feuerstätte und dem Unterdruck des Abgases am Abgasstutzen der Feuerstätte, welcher notwendig ist, um einen einwandfreien Betrieb der Feuerstätte sicherzustellen

3.13**notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück** P_{FV}

Druckdifferenz zwischen der Achse der Einmündung des Verbindungsstückes und der Achse des Abgasstutzens der Feuerstätte, gebildet durch die Differenz zwischen dem Ruhedruck und dem Widerstandsdruck des Verbindungsstückes

3.14**notwendiger Förderdruck für die Zuluft** P_B

Differenz zwischen dem Luftdruck im Freien und dem Luftdruck im Aufstellungsraum der Feuerstätte in gleicher Höhe

3.15**notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage** P_{Ze}

Summe des notwendigen Förderdruckes für die Feuerstätte, des notwendigen Förderdruckes für das Verbindungsstück und des notwendigen Förderdruckes für die Zuluft

3.16**Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage** P_{ZO}

Summe aus der Differenz des Widerstandsdruckes und dem Ruhedruck des senkrechten Abschnitts der Abgasanlage und dem Winddruck

3.17**zur Verfügung stehender Förderdruck der Feuerstätte** P_{WO}

maximal zulässiger Druckunterschied zwischen dem statischen Druck des Abgases am Abgasstutzen der Feuerstätte und dem statischen Luftdruck an der Zuluftzuführung der Feuerstätte, die für den ordnungsgemäßen Betrieb der Feuerstätte vorgesehen ist

3.18**maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage** P_{Zoe}

Differenz zwischen dem zur Verfügung stehenden Förderdruck der Feuerstätte, dem notwendigen Förderdruck für das Verbindungsstück und dem notwendigen Förderdruck für die Zuluft

3.19**Nebenluft**

Umgebungsluft, die dem Abgas zusätzlich zum Nenn-Abgasmassenstrom beigemischt wird

3.20**Nebenluftvorrichtung**

Abgasklappe oder Strömungssicherung

3.21**Zugbegrenzer**

Vorrichtung, die automatisch der Abgasanlage, dem Verbindungsstück oder der Feuerstätte Umgebungsluft zuführt

3.22**Strömungssicherung**

Einrichtung, die im Abgasweg einer Feuerstätte angeordnet ist, um die Verbrennungsgüte innerhalb der vorgegebenen Grenzen aufrechtzuerhalten und um die Verbrennung in einem bestimmten Bereich der Abströmung und der Rückströmung stabil zu halten

3.23**Grenztemperatur an der Innenwand** T_g

erforderliche Mindesttemperatur an der Innenwand an der Mündung der Abgasanlage

3.24

Luft-Abgas-System

System von konzentrisch oder nicht-konzentrisch angeordneten Leitungen zur Zuführung der Verbrennungsluft von der Außenluft zur Feuerstätte und Abführung der Verbrennungsprodukte an die Außenluft

3.25

Zuluftleitung

Bauteil oder Bauteile, (das) die parallel zur Abgasanlage geführt werden (wird) (daneben stehend oder konzentrisch), welche(s) die Verbrennungsluft von der Außenluft zur Einführungsstelle der Zuluftleitung zur Feuerstätte führt (führen).

3.26

Luft-Abgasanlage

Abgasanlage, bei der, der Ort für den Eintritt der Zuluft in die Zuluftleitung neben dem Ort für den Auslass zur Abführung der Verbrennungsprodukte liegt. Dabei sind Einlass und Auslass so anzuordnen, dass Windverhältnisse die Verbrennungsluftansaugung nicht ungünstig beeinflussen

3.27

Abschnitt der Abgasanlage

ein zu Berechnungszwecken eingeteilter Abschnitt der Abgasanlage

3.28

Kondensat-Massenstrom

\dot{m}_D

Masse des Wasserdampfes, die sich durch Kondensationsvorgänge in der Feuerstätte, dem Verbindungsstück oder der Abgasleitung/dem Schornstein in der Zeiteinheit ergibt

3.29

Zuluftleitung

Bauteil oder Bauteile, welche(s) den Auslass der Zuluftleitung mit der raumluftunabhängigen Feuerstätte verbindet bzw. verbinden

3.30

Kondensationsfaktor

f_k

Anteil des theoretisch höchstens auftretenden Kondensatmassenstromes, der in der Berechnung verwendet wird

4 Formelzeichen, Benennungen, Einheiten

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

Tabelle 1 — Formelzeichen, Benennungen und Einheiten

Formelzeichen	Benennung	Einheit
A	Querschnittsfläche	m^2
c	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg \cdot K)$
c_p	spezifische Wärmekapazität des Abgases	$J/(kg \cdot K)$
d	Schichtdicke	m
D	Durchmesser	m
D_h	hydraulischer Durchmesser	m
H	wirksame Höhe des senkrechten Abschnitts der Abgasanlage	m
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Benennung	Einheit
K	Abkühlzahl	
L	Länge	m
\dot{m}	Abgasmassenstrom	kg/s
Nu	Nusselt-Zahl	
p	statischer Druck	Pa
p_L	Außenluftdruck	Pa
P_B	notwendiger Förderdruck für die Zuluft	Pa
P_E	Widerstandsdruck aus Reibung und Formwiderstand im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{FV}	notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück	Pa
P_G	Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_H	Ruhedruck	Pa
P_{HV}	Ruhedruck im Verbindungsstück	Pa
P_L	Winddruck	Pa
P_{NL}	notwendiger Förderdruck für Nebenluftvorrichtungen	Pa
P_R	Widerstandsdruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{RV}	Widerstandsdruck für das Verbindungsstück	Pa
P_W	notwendiger Förderdruck für die Feuerstätte	Pa
P_{WO}	zur Verfügung stehender Förderdruck der Feuerstätte	Pa
P_Z	Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{Ze}	notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{ZO}	Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{ZOe}	maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
Pr	Prandtl-Zahl	Pa
P_W	notwendiger Förderdruck für die Feuerstätte	Pa
P_{WO}	zur Verfügung stehender Förderdruck der Feuerstätte	Pa
P_Z	Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{Ze}	notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{ZO}	Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
P_{ZOe}	maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage	Pa
Pr	Prandtl-Zahl	
q_C	Wärmestrom vom Abgas auf die Außenschale	kW
σ_{Rad}	Strahlung des schwarzen Körpers	W/(m ² · K ⁴).

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Benennung	Einheit
Q	Wärmeleistung	kW
Q_F	Feuerungswärmeleistung	kW
Q_N	Nennwärmeleistung	kW
r	mittlere Rauigkeit der Innenwand	m
R	Gaskonstante des Abgases	J/(kg · K)
R_L	Gaskonstante der Luft	J/(kg·K)
Re	Reynolds-Zahl	
s	lichte Weite	m
S_E	strömungstechnische Sicherheitszahl	
S_H	Korrekturfaktor für fehlende Temperaturbeharrung	°C
t	Temperatur	
T	absolute Temperatur	K
T_g	Grenztemperatur	K
T_{io}	Innenwand-Temperatur an der Mündung	K
T_{iob}	Innenwand-Temperatur an der Mündung für Temperaturbeharrung	K
T_L	Außenlufttemperatur	K
T_m	mittlere Temperatur des Abgases	K
T_p	Wasserdampftaupunkt	K
T_{sp}	Taupunkttemperatur	K
T_u	Umgebungstemperatur	K
T_{ub}	Umgebungstemperatur des Heizraumes	K
T_{uh}	Umgebungstemperatur für beheizte Bereiche	K
T_{ul}	Umgebungstemperatur für Bereiche außerhalb eines Gebäudes	K
T_{uo}	Umgebungstemperatur für Außenbereiche	K
T_{uu}	Umgebungstemperatur für unbeheizte Bereiche innerhalb eines Gebäudes	K
T_W	Abgastemperatur der Feuerstätte	K
T_{WN}	Abgastemperatur bei Nennwärmeleistung	K
T_{Wnmi}	Abgastemperatur bei der niedrigsten Wärmeleistung	m
U	Umfang	
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 ·K)
β	Verhältnis der Massenströme Verbrennungsluft zu Abgas	
γ	Winkel bei Richtungsänderungen	°
δ	Wangendicke	M

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Benennung	Einheit
ζ	Einzelwiderstandszahl für Umlenkungen und/oder Querschnitts-änderungen und/oder Änderungen des Abgasmassenstroms	Ns/m ²
η	dynamische Viskosität	
η_W	Wirkungsgrad der Feuerstätte	
η_{WN}	Wirkungsgrad der Feuerstätte bei Nennwärmeleistung	
λ	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	W/(m · K)
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_L	Dichte der Außenluft	kg/m ³
ρ_m	über eine Strecke und über einen Querschnitt gemittelte Dichte der Abgase	kg/m ³
$\sigma(\text{CO}_2)$	Volumenkonzentration an CO ₂	%
$\sigma(\text{H}_2\text{O})$	Volumenkonzentration an Wasserdampf	%
ψ	Rohrreibungszahl	
$\left(\frac{1}{A}\right)$	Wärmedurchlasswiderstand	m ² · K/W

Tabelle 2 — Zusätzliche Indizes

Index	Benennung	Einheit
a	Außenseite	—
A	Abgas	—
b	Temperaturbeharrung	—
B	Zuluft	—
e	Eintritt	—
G	Geschwindigkeitsänderung	—
i	Innenseite	—
L	Außenluft	—
m	Mittelwert	—
M	Mischung	—
n	laufender Index	—
N	Nennwert	—
NL	Nebenluft	—
o	Austritt	—
O	Überdruck	—
u	Umgebungsluft	—
V	Verbindungsstück	—
W	Feuerstätte	—

5 Berechnungsverfahren für Nicht-LAS-Abgasanlagen

5.1 Allgemeine Grundsätze

Die Berechnung der Innenabmessungen (Querschnitt) von Unterdruck-Abgasanlagen, basiert auf folgenden drei Kriterien:

- der Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage muss entweder gleich oder größer sein, als der notwendige Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage;
- der Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage muss entweder gleich oder größer sein, als der notwendige Förderdruck für die Zuluft;
- die Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage muss entweder gleich oder größer sein als die Grenztemperatur.

Die Berechnung der Innenabmessungen (Querschnitt) von Überdruckabgasanlagen, basiert auf folgenden drei Kriterien:

- der Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage muss gleich oder kleiner sein als der nutzbare Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage;
- der Überdruck im Verbindungsstück und im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage darf nicht größer sein als deren Auslegungsdruck;
- die Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage muss entweder gleich oder größer sein als die Grenztemperatur.

Die Kriterien werden durch zwei Arten von Umgebungsbedingungen verifiziert:

- die Druckberechnung (Zug) wird unter Bedingungen durchgeführt bei denen die Leistungsfähigkeit der Abgasanlage gering ist (z. B. hohe Außenlufttemperatur); und
- die Berechnung der Innenwandtemperatur an der Mündung wird unter Bedingungen durchgeführt, bei denen die Temperatur in der Abgasanlage gering ist (z. B. niedrige Außenlufttemperatur).

5.2 Druckbedingung

5.2.1 Unterdruckabgasanlage

Folgende Bedingungen sind einzuhalten:

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

$$P_Z \geq P_B \quad \text{in Pa} \quad (2)$$

Dabei ist

P_B der notwendige Förderdruck für die Zuluft (siehe 5.11.3), in Pa;

P_{FV} der notwendige Förderdruck für das Verbindungsstück, in Pa;

P_H der Ruhedruck, in Pa;

P_L der Winddruck, in Pa;

P_R der Widerstandsdruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;

P_W der notwendige Förderdruck für die Feuerstätte, in Pa;

P_Z der Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (siehe 5.10), in Pa;

P_{Ze} der notwendige Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (siehe 5.11), in Pa.

5.2.2 Überdruckabgasanlage

Folgende Bedingungen sind einzuhalten:

$$P_{ZO} = P_R - P_H + P_L \leq P_{WO} - P_B - P_{FV} = P_{Zoe} \quad \text{in Pa} \quad (3)$$

$$P_{ZO} \leq P_{Z \text{ excess}} \quad \text{in Pa} \quad (4)$$

$$P_{ZO} + P_{FV} \leq P_{ZV \text{ excess}} \quad \text{in Pa} \quad (5)$$

Dabei ist

P_{WO}	der Überdruck an der Abgaseinmündung in die Abgasanlage, in Pa;	
P_{Zoe}	der maximale Differenzdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage,	in Pa;
$P_{Z \text{ excess}}$	der höchste zulässige Auslegungsdruck der Abgasanlage,	in Pa;
P_R	der Widerstandsdruck in der Abgasanlage,	in Pa.

5.3 Temperaturbedingung

Folgende Beziehungen sind nachzuweisen:

$$T_{iob} \geq T_g \quad \text{in K} \quad (6)$$

Dabei ist

T_{iob} die Innenwandtemperatur an der Mündung bei Beharrung, in K;

T_g die Grenztemperatur, in K.

Bei Abgasanlagen deren freies Ende über Dach eine Wärmedämmung aufweisen, ist zusätzlich folgende Bedingung einzuhalten:

$$T_{irb} \geq T_g \quad \text{in K} \quad (7)$$

Dabei ist

T_{irb} die Innenwandtemperatur unmittelbar bevor die zusätzliche Dämmung beginnt, in K

Die Grenztemperatur T_g der Innenwand von Abgasanlagen für trockene Betriebsweise ist die Taupunkttemperatur T_{sp} des Abgases (siehe 5.7.6).

Im Falle von Abgasanlagen für feuchte Betriebsweise ist $T_g = 273,15$ K. Diese Bedingung schützt vor Eisbildung an der Mündung der Abgasanlagen.

ANMERKUNG Der Vergleich der Innenwandtemperatur vor der zusätzlichen Dämmung T_{irb} mit der zulässigen Grenztemperatur des Abgases ist nicht erforderlich, wenn der Wert des Wärmedurchlasswiderstandes der zusätzlichen Wärmedämmung $0,1 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$ nicht übersteigt.

Bei Abgasanlagen für feuchte Betriebsweise ist der Vergleich dann nicht erforderlich, wenn der Wert der Umgebungslufttemperatur unmittelbar vor der zusätzlichen Dämmung $\geq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ist.

5.4 Berechnungsgang

Für die Berechnung der Druck- und Temperaturwerte nach den Beziehungen (1), (2), (3), (4), (5) und (6) müssen die Werte für das Abgaswerte-Triple der Feuerstätte nach 5.5 ermittelt werden. Für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage und deren Verbindungsstück sind auch die Daten nach 5.6 zu ermitteln. Für neu zu errichtende Abgasanlagen sollte für die Größe des Innenrohres ein vorgeschätzter Wert eingesetzt werden.

In 5.7 bis 5.11 werden die Berechnungen beschrieben, die notwendig sind, um die thermischen und strömungstechnischen Eigenschaften der Abgasanlage zu erhalten. Die Gleichungen in 5.7 geben die Basisdaten, die für weitere Berechnungen notwendig sind, an.

Die Gleichungen in 5.5.3 und 5.8 geben die Berechnung der maßgeblichen Temperaturen an. Die Gleichungen für die Dichte des Abgases und seine Geschwindigkeit sind in 5.9 zusammengestellt.

Mit den Gleichungen in 5.10 und 5.11 muss die Druckbedingung überprüft werden. Mit den Gleichungen in 5.12 wird die Temperaturbedingung überprüft.

Die Überprüfung der Druck- und Temperaturbedingung muss zweifach erfolgen:

- für die Nennwärmeleistung der Feuerstätte,
- für den niedrigsten Wert des Wärmeleistungsbereichs, der vom Hersteller der Feuerstätte angegeben ist.

Wenn die Temperaturbedingung von Unterdruckabgasanlagen nach den Gleichungen (6) und (7) nicht erfüllt ist, kann versucht werden, das gewünschte Ergebnis durch Berücksichtigung einer Zumischung von Nebenluft in das Abgas nach Abschnitt 6 zu erreichen.

ANMERKUNG Die Temperaturbedingung braucht für folgende Bedingungen nicht eingehalten zu werden, wenn akzeptiert wird, dass bei Nichterfüllung der Temperaturbedingung nicht sichergestellt werden kann, dass keine Feuchtigkeit auftritt.

Die Bedingungen sind:

- Austausch der Feuerstätte < 30 kW, und
- der Abgasverlust der Feuerstätte beträgt mindestens 8 %, und
- die Feuerstätte ist mit einer Strömungssicherung ausgestattet, die während Stillstandsbetrieb oder im Betrieb mit kleinen Leistungen ausreichende Belüftung in der Abgasanlage sicherstellt. Dies kann dadurch sichergestellt werden, dass die Leistung der Feuerstätte überdimensioniert wird.

5.5 Charakteristische Abgaswerte für die Feuerstätte

5.5.1 Allgemeines

Für die Berechnung der Temperatur- und Druckwerte muss das erforderliche Abgaswerte - Triple der Feuerstätte, bestehend aus dem Abgasmassenstrom, der Abgastemperatur und dem notwendigen Förderdruck, oder dem zur Verfügung stehenden Förderdruck ermittelt werden. Zusätzlich müssen die Art des Brennstoffs, die Volumenkonzentration an CO₂ im Abgas und die geometrischen Abmessungen des Verbindungsstückes angegeben werden.

Typische Daten einiger Brennstoffe sind in Tabelle B.1 angegeben.

Typische Daten für einige Feuerstätten sind in den Tabellen B.2 und B.3 angegeben.

5.5.2 Abgasmassenstrom

5.5.2.1 Abgasmassenstrom bei Nennwärmeleistung der Feuerstätte

Zur Berechnung der Druck- und Temperaturwerte nach den Gleichungen (1), (2), (3), (4), (5), und (6) muss der Abgasmassenstrom bei Nennwärmeleistung der Feuerstätte ermittelt werden.

Liegen keine Herstellerwerte für den Abgasmassenstrom und die Volumenkonzentration an CO₂ vor, können diese Werte nach den Gleichungen in den Tabellen B.1, B.2 und B.3 ermittelt werden.

Ist an die Abgasanlage eine Wechselbrennstoff-Feuerstätte angeschlossen, sind in der Berechnung und der Querschnittsbemessung alle in Frage kommenden Brennstoffe zu berücksichtigen.

Bei Feuerstätten mit Strömungssicherung ist der Abgasmassenstrom nach der Strömungssicherung zu berücksichtigen.

Der Abgasmassenstrom \dot{m} eines offenen Kamins hängt von der Größe der Öffnung des Feuerraumes ab. Für die Berechnung ist folgende Gleichung zu verwenden:

$$\dot{m} = f_{mf} \cdot A_F \quad \text{in kg/s} \quad (8)$$

Dabei ist

f_{mf} der Abgasmassenstrom eines offenen Kamins, in kg/(s · m²);

A_F der Querschnitt der Öffnung eines offenen Kamins, in m².

Für offene Kamine, deren Öffnungshöhe gleich oder kleiner als ihre Öffnungsbreite ist, gilt: $f_{mf} = 0,139 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$.

Für offene Kamine, deren Öffnungshöhe größer als ihre Öffnungsbreite ist, gilt: $f_{mf} = 0,167 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$.

Die Volumenkonzentration an CO₂ des Abgases eines offenen Kamines kann angenommen werden zu $\sigma(\text{CO}_2) = 1 \%$.

5.5.2.2 Abgasmassenstrom bei der kleinsten möglichen Wärmeleistung

Wird die Feuerstätte planmäßig modulierend betrieben, müssen die Druck- und Temperaturbedingung zusätzlich bei der kleinsten möglichen Wärmeleistung überprüft werden. Liegen keine Herstellerwerte bei kleinster möglicher Wärmeleistung vor, ist der Abgasmassenstrom mit 1/3 des Wertes bei Nennwärmeleistung zu verwenden.

5.5.2.3 Abgasmassenstrom mit Nebenluft

Wenn Nebenluft durch eine Nebenluftvorrichtung oder durch eine Strömungssicherung zugeführt wird, muss der Nebenluftstrom nach 6.3, in Abhängigkeit von dem vorhandenen Differenzdruck im Aufstellungsraum der Feuerstätte und im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage oder im Verbindungsstück erfolgen.

5.5.3 Abgastemperatur

5.5.3.1 Abgastemperatur bei Nennwärmeleistung (T_{WN})

Die Abgastemperatur bei Nennwärmeleistung T_{WN} muss vom Hersteller der Feuerstätte angegeben werden. Wenn die Feuerstätte mit einer Strömungssicherung ausgestattet ist, muss die Abgastemperatur nach der Strömungssicherung verwendet werden.

Wenn der Hersteller Daten angibt, welche die Abgastemperatur nach der Strömungssicherung, abhängig vom Unterdruck beschrieben, sind diese Werte für die Berechnung zu verwenden.

Wenn die Abgastemperatur T_{WN} für offene Kamine nicht bekannt ist, sollte ein Wert von $t_{WN} = 80 \text{ °C}$ ($T_{WN} = 353,15 \text{ K}$) verwendet werden.

5.5.3.2 Abgastemperatur bei der niedrigsten Wärmeleistung (T_{Wmin})

Die Abgastemperatur bei der niedrigsten Wärmeleistung T_{Wmin} muss vom Hersteller der Feuerstätte angegeben werden. Wenn dieser Wert nicht verfügbar ist, sollte die Abgastemperatur in °C mit 2/3 des Wertes der Abgastemperatur bei Nennwärmeleistung verwendet werden.

5.5.4 Notwendiger Förderdruck für die Feuerstätte (P_W) für Unterdruckabgasanlagen

Bei der Berechnung muss bei Unterdruckabgasanlagen der notwendige Förderdruck für die Feuerstätte P_W vom Hersteller der Feuerstätte angegeben werden.

Liegen keine Werte vor, so sind die Werte für den notwendigen Förderdruck für die Feuerstätte aus den Produktnormen der entsprechenden Feuerstätten zu entnehmen. Sind keine Daten für die Feuerstätte verfügbar, siehe Tabelle B.2.

Ist der Wert für den notwendigen Förderdruck negativ (bei Überdruckbetrieb), ist in die Berechnung der Wert $P_W = 0$ Pa einzusetzen.

Wenn für Gasfeuerstätten des Typs B₁ nach CR 1749 keine gültigen Werte für die Strömungssicherung vom Hersteller angegeben werden, ist der notwendige Förderdruck mit einem Wert von 3 Pa und für alle anderen Gasfeuerstätten mit Strömungssicherung mit einem Wert von 10 Pa anzunehmen.

Der notwendige Förderdruck P_W für offene Kamine sollte mit dessen Daten für den Abgasmassenstrom und den Querschnitt an der Mündung der Abgasanlage berechnet werden. Der Ruhedruck für die Feuerstätte und für den Abgassammler sollte vernachlässigt werden. Der im Abgassammler auftretende Strömungswiderstand wird durch den Wert der strömungstechnischen Sicherheitszahl von $S_E = 1,5$ berücksichtigt.

$$P_W = \frac{\dot{m}^2}{2 \cdot \rho_W \cdot A_W^2} \cdot S_E \quad \text{in Pa} \quad (9)$$

Dabei ist

\dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s;

S_E die strömungstechnische Sicherheitszahl;

ρ_W die Dichte des Abgases im Abgasstutzen des offenen Kamins, in kg/m³;

A_W der Querschnitt im Abgasstutzen des offenen Kamins, in m².

5.5.5 Zur Verfügung stehender Förderdruck der Feuerstätte (P_{WO}) für eine Überdruckabgasanlage

Der für die Berechnung einer Überdruckabgasanlage benötigte zur Verfügung stehende Förderdruck der Feuerstätte P_{WO} ist vom Hersteller der Feuerstätte anzugeben.

5.6 Bauartkennwerte

5.6.1 Allgemeines

Für die Berechnung der notwendigen Druck- und Temperaturgrößen sind zuerst die Rauigkeit der Innenwand und der Wärmedurchlasswiderstand für das Verbindungsstück und für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage zu ermitteln.

5.6.2 Rauigkeit (r)

Die mittlere Rauigkeit der Innenschale ist vom Produkthersteller anzugeben.

Mittlere Rauigkeiten für übliche Werkstoffe von Innenschalen sind in Tabelle B.4 angegeben.

5.6.3 Wärmedurchlasswiderstand ($1/\Lambda$)

Der Wärmedurchlasswiderstand $1/\Lambda$ einer System-Abgasanlage ist den Produktangaben des Herstellers zu entnehmen.

Der Wärmedurchlasswiderstand $1/\Lambda$ von Komponenten der Abgasanlage ist den Produktangaben des Herstellers zu entnehmen und sollte die Einflüsse von Wärmebrücken berücksichtigen (z. B. Fugenverbindungen).

ANMERKUNG Wärmedurchlasswiderstandszahlen für Berechnungszwecke an Systemabgasanlagen und/oder Komponenten sollten üblicherweise unter Berücksichtigung mittlerer Betriebstemperaturen ermittelt werden. Werte für den Wärmedurchlasswiderstand bei Auslegungstemperatur dürfen jedoch auch verwendet werden.

Für mehrschalige Montage-Abgasanlagen kann der Wärmedurchlasswiderstand durch folgende Gleichung ermittelt werden:

$$\left(\frac{1}{\Lambda}\right) = D_h \cdot \sum_n \left[\left(\frac{1}{\Lambda}\right)_n \cdot \frac{1}{D_{h,n}} \right] \quad \text{in m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (10)$$

Dabei ist

D_h der hydraulische Durchmesser, in m;

$D_{h,n}$ der hydraulische Durchmesser der Innenseite jeder Schale, in m;

$\left(\frac{1}{\Lambda}\right)$ der Wärmedurchlasswiderstand einer Rohrschale, bezogen auf deren innere Mantelfläche, in $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$

Sind für einzelne Bauteile keine entsprechenden Daten vorhanden, kann der Wärmedurchlasswiderstand nach Anhang A bestimmt werden. Der Wärmedurchlasswiderstand geschlossener Luftschichten ist in Tabelle B.6 angegeben.

5.7 Grundwerte für die Berechnung

5.7.1 Lufttemperatur

5.7.1.1 Allgemeines

Bei Abgasanlagen, die durch beheizte Zonen geführt werden, muss zwischen Außenlufttemperatur und Umgebungstemperatur unterschieden werden.

5.7.1.2 Außenlufttemperatur (T_L)

Die Außenlufttemperatur T_L muss als höchste Temperatur der Außenluft angesetzt werden, bei der die Abgasanlage üblicherweise betrieben wird.

Die Außenlufttemperatur T_L wird üblicherweise für Heizungsanlagen mit 288,15 K ($t_L = 15^\circ\text{C}$) angenommen.

Andere Werte für T_L können auf der Grundlage akzeptierter nationaler Daten verwendet werden.

5.7.1.3 Umgebungslufttemperatur (T_u)

Für die Überprüfung der Druckbedingung ist für die Umgebungslufttemperatur $T_u = T_L$ zu setzen.

Für die Überprüfung der Temperaturbedingung sind für die Umgebungslufttemperatur T_u folgende Werte zu verwenden:

— bei Abgasanlagen ohne belüftete Luftschächte

$$T_{uo} = 258,15 \text{ K } (t_{uo} = -15 \text{ °C}) \text{ für Abgasanlagen mit feuchter Betriebsweise}$$

$$T_{uo} = 273,15 \text{ K } (t_{uo} = 0 \text{ °C}) \text{ für Abgasanlagen mit trockener Betriebsweise}$$

$$T_{ub} = 288,15 \text{ K } (t_{ub} = 15 \text{ °C})$$

$$T_{uh} = 293,15 \text{ K } (t_{uh} = 20 \text{ °C})$$

$$T_{ul} = T_{uo} \text{ } (t_{ul} = t_{uo})$$

$$T_{uu} = 273,15 \text{ K } (t_{uu} = 0 \text{ °C})$$

— bei Abgasanlagen mit belüfteten Luftschächten und Strömungsrichtung der Luft entsprechend der des Abgases:

$$T_{uo} = 258,15 \text{ K } (t_{uo} = -15 \text{ °C}) \text{ für Abgasanlagen für feuchte Betriebsweise, deren Höhe in nicht beheizten Bereichen im Gebäude und im Freien 5 m übersteigt}$$

$$T_{uo} = 273,15 \text{ K } (t_{uo} = 0 \text{ °C}) \text{ für Abgasanlagen für trockene und feuchte Betriebsweise, deren Höhe in beheizten Bereichen im Gebäude und im Freien 5 m nicht übersteigt}$$

$$T_{ub} = 288,15 \text{ K } (t_{ub} = 15 \text{ °C})$$

$$T_{uh} = 293,15 \text{ K } (t_{uh} = 20 \text{ °C})$$

$$T_{ul} = 288,15 \text{ K } (t_{ul} = 15 \text{ °C}) \text{ wenn die Höhe in nicht beheizten Bereichen im Gebäude und im Freien 5 m nicht übersteigt}$$

$$T_{ul} = T_{uo} \text{ } (t_{ul} = t_{uo}) \text{ wenn die Höhe in nicht beheizten Bereichen im Gebäude und im Freien 5 m übersteigt}$$

$$T_{uu} = 288,15 \text{ K } (t_{uu} = 15 \text{ °C}) \text{ wenn die Höhe in nicht beheizten Bereichen im Gebäude und im Freien 5 m nicht übersteigt}$$

$$T_{uu} = 273,15 \text{ K } (t_{uu} = 0 \text{ °C}) \text{ wenn die Höhe in nicht beheizten Bereichen im Gebäude und im Freien 5 m übersteigt}$$

Andere Werte für T_{uo} können auf Basis national akzeptierter Werte verwendet werden.

Abgasanlagen, die in Sektoren mit unterschiedlichen Umgebungslufttemperaturen angeordnet sind, können entweder abschnittsweise mit derselben Umgebungslufttemperatur berechnet werden, oder die Umgebungslufttemperatur kann für die Berechnung entsprechend den Flächenanteilen bestimmt werden.

$$T_u = \frac{(T_{ub} \cdot A_{ub}) + (T_{uh} \cdot A_{uh}) + (T_{uu} \cdot A_{uu}) + (T_{ul} \cdot A_{ul})}{A_{ub} + A_{uh} + A_{uu} + A_{ul}} \text{ in K} \quad (11)$$

Dabei ist

T_{uo} die Umgebungstemperatur an der Mündung der Abgasanlage, in K;

T_{ub} die Umgebungstemperatur im Aufstellraum der Feuerstätte, in K;

T_{uh} die Umgebungstemperatur in beheizten Bereichen, in K;

T_{ul} die Umgebungstemperatur außerhalb des Gebäudes, in K;

T_{uu} die Umgebungstemperatur in nicht beheizten Bereichen im Gebäude, in K;

A_{ub} die äußere Oberfläche der Abgasanlage im Aufstellraum der Feuerstätte, in m²;

A_{uh} die äußere Oberfläche der Abgasanlage in beheizten Bereichen, in m²;

A_{ul} die äußere Oberfläche der Abgasanlage außerhalb des Gebäudes, in m²;

A_{uu} die äußere Oberfläche der Abgasanlage in nicht beheizten Bereichen im Gebäude, in m².

ANMERKUNG Wenn die Teile der äußeren Oberfläche außerhalb des Gebäudes und in unbeheizten Bereichen nicht mehr als ¼ der gesamten Oberfläche der Abgasanlage ausmachen, so kann die Umgebungstemperatur T_u mit 288,15 K ($t_u = 15$ °C) angenommen werden.

Wenn bei Abgasanlagen mit belüfteten Luftschächten und Strömungsrichtung der Luft entsprechend der des Abgases, die Länge des Teiles der Abgasanlage im Außenbereich und im nicht beheizten Gebäudebereich 5 m nicht übersteigt, darf die Umgebungslufttemperatur T_u zu 288,15 K ($t_u = 15$ °C) angenommen werden.

Wenn bei Abgasanlagen mit belüfteten Luftschächten und Strömungsrichtung der Luft entgegen der des Abgases die Länge des Teiles der Abgasanlage im Außenbereich und im nicht beheizten Gebäudebereich 5 m nicht übersteigt, darf die Umgebungslufttemperatur T_u zu 273,15 K ($t_u = 0$ °C) angenommen werden.

5.7.2 Außenluftdruck (p_L)

Der Außenluftdruck p_L ist in Abhängigkeit von der Höhenlage über NN nach folgender Formel zu ermitteln:

$$p_L = 97\,000 \cdot e^{(-g \cdot z)/(R_L \cdot T_L)} \quad \text{in Pa} \quad (12)$$

Dabei ist

g die Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²;

R_L die Gaskonstante der Luft, in J/(kg·K);

T_L die Außenlufttemperatur, in K;

z die geodätische Höhe, in m;

97 000 der Außenluftdruck auf Seehöhe, berichtigt wegen Witterungseinflüssen, in Pa.

5.7.3 Gaskonstante

5.7.3.1 Gaskonstante der Luft (R_L)

Die Gaskonstante der Luft R_L beträgt 288 J/(kg·K) (bei einer relativen Luftfeuchte $\sigma(\text{H}_2\text{O})$ von 1,1 % Volumenkonzentration).

5.7.3.2 Gaskonstante des Abgases (R)

Die Gaskonstante des Abgases R wird nach den Gleichungen der Tabellen B.1 und B.3 bestimmt.

5.7.4 Dichte der Außenluft (ρ_L)

Die Dichte der Außenluft ρ_L errechnet sich aus

$$\rho_L = \frac{p_L}{R_L \cdot T_L} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (13)$$

Dabei ist

- p_L der Außenluftdruck, in Pa;
- R_L die Gaskonstante der Luft, in J/(kg·K);
- T_L die Außenlufttemperatur, in K.

5.7.5 Spezifische Wärmekapazität des Abgases (c_p)

Die spezifische Wärmekapazität des Abgases c_p ist nach den Gleichungen in den Tabellen B.1 und B.4 zu berechnen.

5.7.6 Taupunkttemperatur (T_{sp})

Für Gas und Heizöl EL ist die Taupunkttemperatur T_{sp} des Abgases der Wasserdampftaupunkt T_p .

In diesem Falle ist:

$$T_{sp} = T_p \quad (14)$$

Der Wasserdampftaupunkt T_p des Abgases für verschiedene Brennstoffe und Volumenkonzentrationen an CO_2 im Abgas ist nach den Formeln (B.5), (B.6) und (B.7) zu berechnen.

Für Kohle, Schweröl und Holz, ist die Taupunkttemperatur des Abgases gleich dem Säuretaupunkt T_{sp} .

In diesem Falle ist:

$$T_{sp} = T_p + \Delta T_{sp} \quad (15)$$

Für Kohle und Schweröl kann der Anstieg im Taupunkt durch das Schwefeltrioxid im Abgas (ΔT_{sp}) nach der Gleichung in Tabelle B.1 berechnet werden. Für die genaue Bestimmung des Säuretaupunkts ist die Kenntnis der Konvertierung von Schwefeldioxid in Schwefeltrioxid (Konversionsfaktor K_1) notwendig. Als Anhaltspunkt kann davon ausgegangen werden, dass die Volumenkonzentration an Schwefeltrioxid (SO_3) etwa 2 % des Schwefeldioxids (SO_2) beträgt. Für Holz ist der Anstieg der Taupunkttemperatur (ΔT_{sp}) durch Säure mit 15 K zu berücksichtigen.

$$\Delta T_{sp} = 15 \text{ K}$$

5.7.7 Korrekturfaktor für fehlende Temperaturbeherrschung (S_H)

Der Korrekturfaktor S_H für die Temperaturbeherrschung ist mit 0,5 anzusetzen.

5.7.8 Strömungstechnische Sicherheitszahl (S_E)

Die strömungstechnische Sicherheitszahl ist für Unterdruckabgasanlagen mit $S_E = 1,5$ anzusetzen; wenn es sich um genau in ihrer Funktion überwachte Feuerstätten und Abgasanlagen sowie raumluftunabhängige Feuerstätten mit Gebläsebrenner handelt, ist ein Wert von 1,2 anzusetzen.

Für Überdruckabgasanlagen ist der Mindestwert für die strömungstechnische Sicherheitszahl $S_E = 1,2$.

5.8 Ermittlung der Temperaturen

5.8.1 Allgemeines

Für den Druck- und Temperaturnachweis sind die mittleren Abgastemperaturen und die Abgastemperaturen an der Mündung der Abgasanlage zu ermitteln.

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

$$T_m = T_u + \frac{T_e - T_u}{K} \cdot (1 - e^{-K}) \quad \text{in K} \quad (16)$$

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

$$T_o = T_u + (T_e - T_u) \cdot e^{-K} \quad \text{in K} \quad (17)$$

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

$$T_{mV} = T_u + \frac{T_W - T_u}{K_V} \cdot (1 - e^{-K_V}) \quad \text{in K} \quad (18)$$

Die Abgastemperatur an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage T_e errechnet sich aus der folgenden Gleichung:

$$T_e = T_u + (T_W - T_u) \cdot e^{-K_V} \quad \text{in K} \quad (19)$$

Dabei ist

- K die Abkühlzahl (siehe 5.8.2);
- K_V die Abkühlzahl des Verbindungsstückes (siehe 5.8.2);
- T_e die Abgastemperatur am Eintritt des Abgases in die Abgasanlage, in K;
- T_u die Umgebungslufttemperatur (siehe 5.7.1.3), in K;
- T_W die Abgastemperatur der Feuerstätte, in K.

5.8.2 Berechnung der Abkühlzahl

Der Abkühlzahl K errechnet sich aus der folgenden Gleichung:

$$K = \frac{U \cdot k \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (20)$$

Dabei ist

- c_p die spezifische Wärmekapazität des Abgases (siehe 5.7.5), in J/(kg·K);
- k der Wärmedurchgangskoeffizient (siehe 5.8.3), in W/(m²·K);
- L die Länge des senkrechten Abschnitts der Abgasanlage, in m;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom (siehe 5.5.2), in kg/s;
- U der innere Umfang, in m.

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

5.8.3 Wärmedurchgangskoeffizient (k_b)

5.8.3.1 Allgemeines

Der Wärmedurchgangskoeffizient der Abgasanlage bei Temperaturbeharrung k_b ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha} \cdot \alpha_a}} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (21)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient der Abgasanlage für fehlende Temperaturbeharrung k ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + S_H \cdot \left[\left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha} \cdot \alpha_a} \right]} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (22)$$

Dabei ist

- D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;
- D_{ha} der äußere hydraulische Durchmesser, in m;
- S_H der Korrekturfaktor für fehlende Temperaturbeharrung (siehe 5.7.7),
- α_a der äußere Wärmeübergangskoeffizient (siehe 5.8.3.3), in W/(m²·K);
- α_i der innere Wärmeübergangskoeffizient (siehe 5.8.3.2), in W/(m²·K);
- $\left(\frac{1}{\Lambda}\right)$ der Wärmedurchlasswiderstand (siehe 5.6.3), in m²·K/W.

5.8.3.2 Wärmeübergangskoeffizient, innen (α_i)

Der Wärmeübergangskoeffizient in der Abgasanlage α_i errechnet sich aus der folgenden Gleichung:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_A \cdot Nu}{D_h} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (23)$$

Dabei ist

- D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;
- Nu die Nusselt-Zahl;
- λ_A der Wärmeleitkoeffizient des Abgases, in W/(m·K).

Der Wärmeleitkoeffizient des Abgases λ_A ist von der mittleren Abgastemperatur abhängig und wird nach der Gleichung B.9, Tabelle B.1 berechnet.

Die über die Höhe gemittelte Nusselt-Zahl Nu ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$Nu = \left(\frac{\psi}{\psi_{smooth}} \right)^{0,67} \cdot 0,0214 \cdot (Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{L_{ges}} \right)^{0,67} \right] \quad (24)$$

Dabei ist

- D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;
- L_{ges} die gesamte gestreckte Länge vom Abgaseintritt in die Schornsteinanlage bis zur Mündung (L_{gesV} ist die gesamte gestreckte Länge vom Abgasstutzen der Feuerstätte bis zur Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage), in m;
- Pr die Prandtl-Zahl;
- Re die Reynolds-Zahl;
- ψ die Rohrreibungszahl für hydraulisch raue Strömung (siehe 5.10.3.3);
- ψ_{smooth} die Rohrreibungszahl für hydraulisch glatte Strömung (siehe 5.10.3.3 für $r = 0$).

Die Gleichung kann für $2\,300 < Re < 10\,000\,000$ und $\left(\frac{\psi}{\psi_{smooth}}\right) < 3$ sowie $0,6 < Pr < 1,5$ angewendet werden.

Für die mittlere Abgasgeschwindigkeit $w_m < 0,5$ m/s ist die Nusselt-Zahl für $w_m = 0,5$ m/s anzunehmen. Wenn die Reynolds-Zahl unter 2 300 liegt, so ist die Nusselt-Zahl mit $R = 2\,300$ anzunehmen.

Die Prandtl-Zahl Pr ergibt sich aus der Gleichung:

$$Pr = \frac{\eta_A \cdot c_p}{\lambda_A} \quad (25)$$

Die Reynolds-Zahl Re ergibt sich aus der Gleichung:

$$Re = \frac{w_m \cdot D_h \cdot \rho_m}{\eta_A} \quad (26)$$

Dabei ist

- c_p die spezifische Wärmekapazität des Abgases, in J/(kg·K);
- D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;
- w_m die mittlere Abgasgeschwindigkeit (siehe 5.9), in m/s;
- η_A die dynamische Viskosität, in (N·s)/m²;
- λ_A die Wärmeleitfähigkeit des Abgases, in W/(m·K);
- ρ_m die mittlere Dichte des Abgases, in kg/m³.

Die dynamische Viskosität η_A ist von der Abgastemperatur abhängig und ist nach der Gleichung (B.10) in Tabelle B.1 zu berechnen.

Der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i kann auch für Abgasanlagen, die für feuchte Betriebsweise vorgesehen sind, wie angegeben berechnet werden, wenn Kondensationswärmegewinne unberücksichtigt bleiben.

5.8.3.3 Wärmeübergangskoeffizient, außen (α_a)

Der äußere Wärmeübergangskoeffizient α_a ist für innen liegende Verbindungsstücke und Abgasanlagen mit

$\alpha_a = 8$ W/(m²·K); für freiliegende Verbindungsstücke und freistehende Abgasanlagen mit $\alpha_a = 23$ W/(m²·K) einzusetzen.

Für teilweise im Freien liegende Verbindungsstücke oder teilweise freistehende Abgasanlagen ist der Wärmeübergangskoeffizient α_a zu interpolieren.

Für Abgasanlagen im Freien mit Verkleidungen, die eine Luftschichtdicke von mindestens 1 cm und höchstens 5 cm ausbilden, ist mit dem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_a = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu rechnen.

Für hinterlüftete Abgasanlagen (einschließlich Abgasanlagen, die durch ein zusätzliches Innenrohr saniert wurden) ist der Wert von $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ anzunehmen. Für Abgasanlagen mit ruhenden Luftschichten, deren Länge im Freien $\leq 3 D_h$ beträgt, ist ein Wert von $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, in allen anderen Fällen $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ einzusetzen.

5.9 Ermittlung der Dichte des Abgases und der Abgasgeschwindigkeit

5.9.1 Dichte des Abgases (ρ_m)

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

$$\rho_m = \frac{p_L}{R \cdot T_m} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (27)$$

Dabei sind

- p_L der Außenluftdruck (siehe 5.7.2), in Pa;
- R die Gaskonstante des Abgases (siehe 5.7.3.2), in J/(kg·K);
- T_m die mittlere Temperatur des Abgases (siehe 5.8.1), in K.

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

5.9.2 Abgasgeschwindigkeit (w_m)

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

$$w_m = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_m} \quad \text{in m/s} \quad (28)$$

Dabei ist

- A die lichte Querschnittsfläche, in m^2 ;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom (siehe 5.5.1), in kg/s;
- ρ_m die mittlere Dichte des Abgases, in kg/m^3 .

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

5.10 Berechnung der Drücke

5.10.1 Druck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage

5.10.1.1 Unterdruck an der Abgaseinführung in die Unterdruck-Abgasanlage (P_Z)

Der Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage P_Z ist in erster Linie abhängig vom Abgasmassenstrom und von der Abgastemperatur, von der wirksamen Abgasanlagenhöhe, vom Querschnitt und von den maßgebenden Bauartkennwerten (Rauigkeit und Wärmedurchlasswiderstand) der Abgasanlage.

Der Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage P_Z ist nach der folgenden Gleichung zu berechnen:

$$P_Z = P_H - P_R - P_L \quad \text{in Pa} \quad (29)$$

Dabei ist

P_H der Ruhedruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;

P_L der Winddruck, in Pa;

P_R der Widerstandsdruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa.

5.10.1.2 Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Überdruck-Abgasanlage (P_{ZO})

Der Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Überdruck-Abgasanlage P_{ZO} ist in erster Linie abhängig vom Abgasmassenstrom und von der Abgastemperatur, von der wirksamen Abgasanlagenhöhe, vom Querschnitt und von den maßgebenden Bauartkennwerten (Rauigkeit und Wärmedurchlasswiderstand) der Abgasanlage.

Der Überdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage P_{ZO} ist nach folgender Gleichung zu bestimmen:

$$P_{ZO} = P_R - P_H + P_L \quad \text{in Pa} \quad (30)$$

Dabei ist

P_H der Ruhedruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;

P_L der Winddruck, in Pa;

P_R der Widerstandsdruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;

P_{ZO} der Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa.

5.10.2 Ruhedruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (P_H)

Der Ruhedruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage P_H ist aus folgender Gleichung zu errechnen:

$$P_H = H \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_m) \quad \text{in Pa} \quad (31)$$

Dabei ist

H die wirksame Höhe des senkrechten Abschnittes der Abgasanlage, in m;

g die Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²;

ρ_L die Dichte der Außenluft (siehe 5.7.4), in kg/m³;

ρ_m die mittlere Dichte der Abgassäule (siehe 5.9.1), in kg/m³.

5.10.3 Widerstandsdruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (P_R)

5.10.3.1 Allgemeines

Der Widerstandsdruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage P_R ist aus folgender Gleichung zu errechnen:

$$P_R = S_E \cdot P_E + S_{EG} \cdot P_G \quad \text{in Pa} \quad (32)$$

$$P_R = S_E \cdot \left(\psi \cdot \frac{L}{D_h} + \sum_n \zeta_n \right) \frac{\rho_m}{2} \cdot w_m^2 + S_{EG} \cdot P_G \quad \text{in Pa} \quad (33)$$

Für $P_G \geq 0$ $S_{EG} = S_E$

Für $P_G < 0$ $S_{EG} = 1,0$

Dabei ist

- D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;
- L die Länge des senkrechten Abschnitts der Abgasanlage, in m;
- P_E der Widerstandsdruck aus Reibung und Formwiderstand im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;
- P_G die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;
- S_E die strömungstechnische Sicherheitszahl (siehe 5.7.8);
- S_{EG} die strömungstechnische Sicherheitszahl für Druckänderungen durch Geschwindigkeitsänderung,
- w_m die mittlere Abgasgeschwindigkeit (siehe 5.9.2), in m/s;
- ρ_m die mittlere Dichte der Abgassäule (siehe 5.9.1), in kg/m^3 ;
- ψ die Rohrreibungszahl.
- $\sum_n \zeta_n$ die Summe der Einzelwiderstandszahlen.

5.10.3.2 Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (P_G)

Die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage P_G ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$P_G = \frac{\rho_2}{2} \cdot w_2^2 - \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 \quad \text{in Pa} \quad (34)$$

Dabei ist

- w_1 die Abgasgeschwindigkeit vor der Geschwindigkeitsänderung, in m/s;
- w_2 die Abgasgeschwindigkeit nach der Geschwindigkeitsänderung, in m/s;
- ρ_1 die Dichte des Abgases vor der Geschwindigkeitsänderung, in kg/m^3 ;
- ρ_2 die Dichte des Abgases nach der Geschwindigkeitsänderung, in kg/m^3 .

Für die Geschwindigkeiten w_1 und w_2 und die Dichten ρ_1 und ρ_2 vor und nach einer Geschwindigkeitsänderung können die Mittelwerte für die entsprechenden Abschnitte eingesetzt werden.

5.10.3.3 Rohrreibungszahl des Abgaswegs (ψ)

Der Rohrreibungszahl des Abgasweges ψ muss für verschiedene Rauigkeiten mit folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\psi}} + \frac{r}{3,71 \cdot D_h} \right) \quad (35)$$

Dabei ist

- D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;
- r der Mittelwert der Rauigkeit der Innenwand, in m;
- Re die Reynolds-Zahl;
- ψ der Rohrreibungskoeffizient des Abgaswegs.

Für Reynolds-Zahlen unter 2 300, ist der Wert der Reynolds-Zahl zur Ermittlung der Rohrreibungszahl mit 2 300 anzunehmen.

Mittlere Rauigkeitsbeiwerte sind vom Hersteller anzugeben. Liegen keine Werte vor, können typische mittlere Rauigkeitswerte für verschiedene Werkstoffe der Tabelle B.4 entnommen werden.

5.10.3.4 Einzelwiderstandszahlen (ζ) aufgrund von Richtungs- und/oder Querschnittsänderung und/oder Änderung des Abgasmassenstromes in der Abgasanlage

Die Einzelwiderstandszahlen aufgrund von Richtungs- und/oder Querschnittsänderungen und/oder Änderungen des Abgasmassenstromes sind den Herstellerangaben zu entnehmen. Liegen keine Werte vor, können typische Werte für Einzelwiderstandszahlen Tabelle B.8 entnommen werden.

Der Einzelwiderstand für die Querschnittserweiterung an der Mündung kann entfallen, wenn die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung an dieser Stelle nicht berücksichtigt wird.

5.10.4 Winddruck (P_L)

Der Winddruck P_L ist mit 25 Pa für Inland-Regionen (mehr als 20 km von der Küste) und mit 40 Pa für Küsten-Regionen anzunehmen, wenn die Mündung der Abgasanlage in einem ungünstigen Winddruckbereich liegt. Wenn die Mündung der Abgasanlage weniger als 0,4 m über dem Dachfirst endet und der horizontale Abstand von der Abgasanlage zur Dachfläche oder die Projektionslinie des Firstes bis zur Mündung der Abgasanlage weniger als 2,3 m beträgt, ist davon auszugehen, dass die Mündung im ungünstigen Druckbereich liegt, bzw. wenn die Mündung wie folgt angeordnet ist:

bei einer Dachneigung von mehr als 40° oder

- bei einer Dachneigung von mehr als 25°, wenn die Öffnung der Verbrennungsluft-Zufuhr und die Mündung der Abgasanlage auf verschiedenen Seiten des Firstes liegen und der horizontale Abstand von der Spitze des Firstes mehr als 1,0 m beträgt.

ANMERKUNG Abgasanlagen können auch dann in einem ungünstigen Winddruckbereich liegen, wenn sich Hindernisse wie Gebäude, Bäume, Berge in der Nachbarschaft befinden. Mündungen von Abgasanlagen, die innerhalb eines Umkreises von 15 m von angrenzenden Gebäudestrukturen und in einem Winkel gegenüber der Horizontalen von mehr als 30° liegen sowie Mündungen von Abgasanlagen bei denen der Höhenwinkel von der Horizontalen der Mündung aus gesehen zum oberen Rand der Gebäudestruktur mehr als 10° beträgt, können durch Windturbulenzen beeinflusst werden (siehe Anhang C). Dieser Einfluss kann mit aerodynamischen Aufsätzen kompensiert werden.

Der Wert P_L muss verringert werden, wenn die Mündung der Abgasanlage mit einem Aufsatz mit besonderen aerodynamischen Eigenschaften versehen wird. In allen anderen Fällen ist P_L mit 0 Pa zu setzen.

Festlegungen für Aufsätze mit entsprechenden aerodynamischen Eigenschaften sind in prEN 1856-1, EN 1859 und prEN 13502 zu finden.

5.11 Notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (P_{Ze}) und maximaler nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage (P_{Zoe})

5.11.1 Allgemeines

Der notwendige Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt einer Unterdruck-Abgasanlage P_{Ze} setzt sich aus dem notwendigen Förderdruck für die Feuerstätte P_W , dem notwendigen Förderdruck für das Verbindungsstück P_{FV} und dem notwendigen Förderdruck für die Zuluft P_B zusammen.

$$P_{Ze} = P_W + P_{FV} + P_B \quad \text{in Pa} \quad (36)$$

Dabei ist

P_{Ze} der notwendige Unterdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;

P_W der notwendige Förderdruck für die Feuerstätte, in Pa;

P_{FV} der notwendige Förderdruck für das Verbindungsstück, in Pa;

P_B der notwendige Förderdruck für die Zuluft bei einem bestimmten Abgasmassenstrom, in Pa.

Der höchste Differenzdruck P_{Zoe} an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt einer Überdruck-Abgasanlage ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$P_{Zoe} = P_{W0} - P_B - P_{FV} \quad \text{in Pa} \quad (37)$$

Dabei ist

P_{Zoe} der zur Verfügung stehende Förderdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa;

P_{W0} der zur Verfügung stehende Förderdruck am Abgasstutzen der Feuerstätte, in Pa;

P_{FV} der notwendige Förderdruck für das Verbindungsstück, in Pa;

P_B der notwendige Förderdruck für die Zuluft bei einem bestimmten Abgasmassenstrom, in Pa.

5.11.2 Notwendiger Förderdruck für die Feuerstätte (P_W) und zur Verfügung stehender Förderdruck für die Feuerstätte (P_{W0})

Der notwendige Förderdruck für die Feuerstätte P_W oder der zur Verfügung stehende Förderdruck für die Feuerstätte (P_{W0}) ist nach 5.5.3 oder 5.5.4 zu ermitteln.

5.11.3 Notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück (P_{FV})

5.11.3.1 Allgemeines

Der notwendige Förderdruck für das Verbindungsstück P_{FV} muss nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$P_{FV} = P_{RV} - P_{HV} \quad \text{in Pa} \quad (38)$$

Dabei ist

P_{HV} der Ruhedruck im Verbindungsstück, in Pa;

P_{RV} der Widerstandsdruck 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.

5.11.3.2 Ruhedruck im Verbindungsstück (P_{HV})

Der Ruhedruck im Verbindungsstück P_{HV} ist aus folgender Gleichung zu errechnen:

$$P_{HV} = H_V \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_{mV}) \quad \text{in Pa} \quad (39)$$

Dabei ist

g die Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²;

H_V der Höhenunterschied zwischen dem Abgaseintritt in die Abgasanlage und dem Abgasstutzen der Feuerstätte, in m;

ρ_L die Dichte der Außenluft (siehe 5.7.4), in kg/m³;

ρ_{mV} die mittlere Dichte des Abgases im Verbindungsstück, in kg/m³.

Liegt der Abgaseintritt in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage tiefer als der Abgasstutzen der Feuerstätte, so wird P_{HV} negativ.

5.11.3.3 Widerstandsdruck im Verbindungsstück (P_{RV})

Der Widerstandsdruck des Verbindungsstückes P_{RV} ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$P_{RV} = S_E \cdot P_{EV} + S_{EG} \cdot P_{GV} \quad \text{in Pa} \quad (40)$$

$$P_{RV} = S_E \cdot \left(\psi_V \cdot \frac{L_V}{D_{hV}} + \sum_n \zeta_{Vn} \right) \frac{\rho_{mV}}{2} \cdot w_{mV}^2 + S_{EGV} \cdot P_{GV} \quad \text{in Pa} \quad (41)$$

Für $P_{GV} \geq 0$ $S_{EGV} = S_E$

Für $P_{GV} < 0$ $S_{EGV} = 1,0$

Dabei ist

D_{hV} der innere hydraulische Durchmesser des Verbindungsstückes, in m;

L_V die Länge des Verbindungsstückes, in m;

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

P_{GV} die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung im Verbindungsstück, in Pa;

S_E die strömungstechnische Sicherheitszahl;

S_{EGV} die strömungstechnische Sicherheitszahl für Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung;

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

ρ_{mV} die mittlere Dichte der Abgassäule im Verbindungsstück, in kg/m^3 ;

ψ_V die Rohrreibungszahl des Verbindungsstückes (siehe 5.10.3.2);

$\sum_n \zeta_{Vn}$ Summe der Einzelwiderstandszahlen durch Umlenkung und Querschnittsänderungen, in m.

Die mittlere Geschwindigkeit w_{mV} des Abgases im Verbindungsstück muss mit der Gleichung (28) mit den Werten für das Verbindungsstück berechnet werden.

Die Rohrreibungszahl des Verbindungsstückes muss mit der Gleichung (35) mit den Werten für das Verbindungsstück berechnet werden.

ANMERKUNG Die Summe der Einzelwiderstandszahlen $\sum_n \zeta_{Vn}$ für das Verbindungsstück ist abhängig von den Querschnitts- und Richtungsänderungen zwischen Abgasstutzen der Feuerstätte und dem senkrechten Abschnitt der Abgasanlage. ζ -Werte sind für übliche Querschnitts- und Richtungsänderungen in Tabelle B.8 angegeben.

Die Druckänderungen durch Geschwindigkeitsänderungen im Verbindungsstück P_{GV} werden mit der Gleichung (34) mit den Werten für das Verbindungsstück berechnet.

5.11.4 Notwendiger Förderdruck für die Zuluft (P_B)

Der notwendige Förderdruck für die Zuluft P_B ist entsprechend der Beschaffenheit des Aufstellungsraumes der Feuerstätte zu bestimmen (Größe, Art und Anzahl der Fenster und Türen, Ausstattung mit Lüftungsanlagen und weiteren Feuerstätten usw.).

Für Aufstellräume ohne Zuluftöffnungen ist P_B mit 4 Pa anzusetzen.

Wird dem Aufstellraum die Verbrennungsluft durch Lüftungsöffnungen oder Verbrennungsluft-Leitungen mit über die Länge gleich bleibendem Querschnitt zugeführt, ergibt sich P_B aus folgender Gleichung:

$$P_B = S_{EB} \cdot \left(\psi_B \cdot \frac{L_B}{D_{hB}} + \sum_n \zeta_{B,n} \right) \frac{\rho_B}{2} \cdot w_B^2 \quad \text{in Pa} \quad (42)$$

Dabei ist

D_{hB} der innere hydraulische Durchmesser der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung, in m;

L_B die gestreckte Länge der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung, in m;

S_{EB} die strömungstechnische Sicherheitszahl für die Verbrennungsluftansaugung (S_{EB} ist üblicherweise 1,2),

w_B die Geschwindigkeit in der Lüftungsöffnung oder der Verbrennungsluftleitung, in m/s;

ρ_B die Dichte der Verbrennungsluft, in kg/m^3 ;

ψ_B die Rohrreibungszahl der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung;

$\sum_n \zeta_{B,n}$ die Summe der Einzelwiderstandszahlen für Umlenkungen und/oder Querschnittsänderungen und/oder Änderungen des Massenstroms der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitungen.

ANMERKUNG Wenn es regionale Vorschriften zulassen, kann die Berechnung vereinfacht werden, indem für P_B ein konstanter Wert von 3 Pa angenommen wird.

Für die Ermittlung der Rohrreibungszahl der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung ψ_B gilt Gleichung (35).

Die Einzelwiderstandszahlen aufgrund von Richtungs- und/oder Querschnittsänderungen und/oder Änderungen des Massenstromes von Zuluftöffnungen oder Verbrennungsluftleitungen $\sum_n \zeta_{B,n}$ sind für deren Einlass, Auslass und deren Richtungsänderungen über die ganze Länge der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung aufzusummieren.

Die Geschwindigkeit in der Verbrennungsluftleitung w_B ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$w_B = \frac{\beta \cdot \dot{m}}{A_B \cdot \rho_B} \quad \text{in m/s} \quad (43)$$

Dabei ist

- A_B der Querschnitt der Verbrennungsluftleitung, in m^2 ;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s ;
- β das Verhältnis der Massenströme Verbrennungsluft zu Abgas,
- ρ_B die Dichte der Verbrennungsluft, in kg/m^3 .

ANMERKUNG Näherungsweise darf $\beta = 0,9$ angenommen werden.

Die Dichte der Verbrennungsluft ist mit Gleichung (13) mit den entsprechenden Werten für die Lufttemperatur und Luftdruck zu ermitteln.

5.12 Berechnung der Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage (T_{iob})

Die Berechnung der Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage T_{iob} ist bei Temperaturbeharrung nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$T_{iob} = T_{ob} - \frac{k_{ob}}{\alpha_i} (T_{ob} - T_{uo}) \quad \text{in K} \quad (44)$$

Dabei ist

- k_{ob} der Wärmedurchgangskoeffizient an der Mündung der Abgasanlage bei Temperaturbeharrung, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- T_{ob} die Abgastemperatur an der Mündung der Abgasanlagen bei Temperaturbeharrung, in K;
- T_{uo} die Umgebungstemperatur für den Temperaturvergleich an der Mündung der Abgasanlage, in K;
- α_i der innere Wärmeübergangskoeffizient, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Der Wärmedurchgangskoeffizient an der Mündung der Abgasanlage k_{ob} bei Temperaturbeharrung ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$k_{ob} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \left(\frac{1}{\Lambda}\right)_o + \frac{D_h}{D_{hao} \cdot \alpha_{ao}}} \quad \text{in } \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (45)$$

Dabei ist

D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;

D_{ha0} der äußere hydraulische Durchmesser an der Mündung der Abgasanlage, in m;

α_i der innere Wärmeübergangskoeffizient an der Mündung der Abgasanlage, in $W/(m^2 \cdot K)$;

α_{a0} der äußere Wärmeübergangskoeffizient an der Abgasanlagenmündung, in $W/(m^2 \cdot K)$;

$\left(\frac{1}{\Lambda}\right)$ der Wärmedurchlasswiderstand, in $m^2 \cdot K/W$;

$\left(\frac{1}{\Lambda}\right)_0$ der zusätzlich anrechenbare Wärmedurchlasswiderstand für mögliche Dämmung an der Mündung der Abgasanlagen unter Berücksichtigung des inneren hydraulischen Durchmessers, in $m^2 \cdot K/W$.

Wenn die Abgasanlage im Bereich über dem Dach zusätzlich gedämmt ist, so ist die Innenwand-Temperatur für den Teil der Abgasanlage, der unmittelbar vor der zusätzlichen Wärmedämmung angeordnet ist, zu berechnen.

Die Innenwand-Temperatur T_{irb} bis zur beginnenden zusätzlichen Wärmedämmung muss nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$T_{irb} = T_{rb} - \frac{k_b}{\alpha_i} (T_{rb} - T_{ur}) \quad \text{in K} \quad (46)$$

Dabei ist

T_{rb} die Abgastemperatur unmittelbar vor der zusätzlichen Wärmedämmung bei Temperaturbeharrung, in K;

k_b der Wärmedurchgangskoeffizient der Abgasanlage bei Temperaturbeharrung, in $W/(m^2 \cdot K)$;

T_{ur} die Umgebungslufttemperatur unmittelbar vor der zusätzlichen Wärmedämmung, in K.

Der zusätzlich anrechenbare Wärmedurchlasswiderstand an der Mündung der Abgasanlage $(1/\Lambda)_0$ ist nach 5.6.3 für allseits angebrachte zusätzliche Wärmedämmschichten zu berechnen. Luftschichten mit einer Schichtdicke kleiner als 1 cm dürfen für den zusätzlichen anrechenbaren Wärmedurchlasswiderstand $(1/\Lambda)_0$ nicht berücksichtigt werden. Bei hinterlüfteten Verkleidungen gilt grundsätzlich $(1/\Lambda)_0 = 0 \text{ (m}^2 \cdot K)/W$ für die Schichten an der Außenseite des Belüftungsspalt.

ANMERKUNG Ein Wert von $(1/\Lambda)_0 = 0,1 \text{ (m}^2 \cdot K)/W$ darf ohne weiteren Nachweis angesetzt werden, wenn der Abschnitt der Abgasanlage übers Dach mindestens 11,5 cm dick ummauert ist (Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0,85 \text{ (m} \cdot K)/W$), oder allseitig mit mindestens 3 cm zusätzlicher Wärmedämmung (Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0,1 \text{ W/(m} \cdot K)$) versehen ist.

6 Nebenluft für Unterdruck-Abgasanlagen

6.1 Allgemeines

Wenn die Temperaturbedingung nach 5.3 nicht erfüllt ist und wenn dabei die Innenwandtemperatur nach Gleichung (44) oder (46) ohne die Zuführung von Nebenluft in die Abgasanlage berechnet wurde, kann es möglich sein, die Temperaturbedingung zu erfüllen, wenn Nebenluft zugeführt wird. In diesem Fall müssen weitere Berechnungen angestellt werden, um nachzuweisen, dass die Temperaturbedingung durch Zumischen von Nebenluft erfüllt werden kann.

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Druckbedingung nach 5.2 erfüllt ist, wenn die Berechnung ohne Nebenluft erfolgt.

6.2 Berechnungsgang

Die Berechnung ist abschnittsweise ab Abgasstutzen der Feuerstätte bis zum Einbauort der Nebenluftvorrichtung und von dort mit geänderten Werten für den Abgasmassenstrom, die Abgastemperatur und die Abgaszusammensetzung bis zur Mündung der Abgasanlage durchzuführen.

Bei der Berücksichtigung von Nebenluft wird der Nebenluftmassenstrom zum Abgasmassenstrom addiert. Aus den Temperaturen und der Zusammensetzung des Abgases vor der Nebenluftbeimischung und der Nebenluft sind die Mischtemperatur und die Zusammensetzung des Abgas-Nebenluftgemisches 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 frei gewählten Nebenluftstrom iterativ so lange durchzuführen, bis die Funktionsbedingungen erfüllt sind oder bis der überschüssige Unterdruck aufgebraucht ist ($P_Z = P_{Ze}$).

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

6.3 Grundwerte für die Nebenluftberechnung

6.3.1 Allgemeines

Für die Temperatur der Nebenluft T_{NL} ist die Lufttemperatur des Raumes anzunehmen, dem sie entnommen wird.

Die Außenlufttemperatur ist mit $T_L = T_{uo}$ (siehe 5.7.1.2) anzusetzen. Für die Berechnung des Nebenluftmassenstromes sind die Umgebungstemperaturen für die Überprüfung der Temperaturbedingungen nach 5.7.1.2 maßgebend.

6.3.2 Mischungsgleichungen

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

$$\dot{m}_M = \dot{m} + \dot{m}_{NL} \quad \text{in kg/s} \quad (47)$$

Die Abgastemperatur nach Nebenluftbeimischung T_M ergibt sich aus:

$$T_M = \frac{\dot{m} \cdot c_{pA} \cdot T_A + \dot{m}_{NL} \cdot c_{pNL} \cdot T_{NL}}{\dot{m} \cdot c_{pA} + \dot{m}_{NL} \cdot c_{pNL}} \quad \text{in K} \quad (48)$$

Die Volumenkonzentration an CO_2 und H_2O nach Nebenluftbeimischung ergibt sich aus:

$$\sigma(\text{CO}_2)_M = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot [100 - \sigma(\text{H}_2\text{O})] \cdot \sigma(\text{CO}_2)}{\dot{m} \cdot R \cdot [100 - \sigma(\text{H}_2\text{O})] + \dot{m}_{NL} \cdot R_L \cdot [100 - \sigma(\text{H}_2\text{O})_{NL}]} \quad \text{in \%} \quad (49)$$

$$\sigma(\text{H}_2\text{O})_M = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot \sigma(\text{H}_2\text{O}) + \dot{m}_{NL} \cdot R_L \cdot \sigma(\text{H}_2\text{O})_{NL}}{\dot{m} \cdot R + \dot{m}_{NL} \cdot R_L} \quad \text{in \%} \quad (50)$$

Der Wasserdampfgehalt der Nebenluft ist mit 1,1 % anzunehmen. Der Wert korrespondiert mit einer relativen Luftfeuchte von 60 % bei 15 °C.

Dabei ist

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

6.4 Druckberechnung

6.4.1 Notwendiger Förderdruck für die Zuluft bei Nebenluft (P_{BNL})

Für Räume ohne Lüftungsöffnungen muss der notwendige Förderdruck für die Zuluft P_{BNL} bei Nebenluft und Nennwärmeleistung nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$P_{BNL} = P_B \cdot \left(1 + \frac{\dot{m}_{NL}}{\beta \cdot \dot{m}} \right)^{1,5} \quad \text{in Pa} \quad (51)$$

Dabei ist

- \dot{m}_{NL} der Nebenluftmassenstrom, in kg/s;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom vor Nebenluftbeimischung, in kg/s;
- P_B der notwendige Förderdruck für die Zuluft ohne Nebenluft (siehe 5.11.4);
- β das Verhältnis des Verbrennungsluftmassenstromes zum Abgasmassenstrom (siehe 5.11.4).

Wenn die Verbrennungsluft durch Lüftungsöffnungen oder Rohrleitungen mit gleichem Querschnitt über die ganze Länge abgeführt wird, so leitet sich P_{BNL} aus folgender Gleichung ab:

$$P_{BNL} = S_{EB} \cdot \left(\psi_{BNL} \cdot \frac{L_B}{D_{hB}} + \sum_n \zeta_{B,n} \right) \frac{\rho_B}{2} w_{BNL}^2 \quad (52)$$

Dabei ist

- D_{hB} der innere hydraulische Durchmesser der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung (siehe 5.11.4), in m;
- L_{B} die Länge der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung (siehe 5.11.4), in m;
- S_{EB} die strömungstechnische Sicherheitszahl der Zuluft (siehe 5.11.4);
- w_{BNL} die Geschwindigkeit in Lüftungsöffnungen oder Verbrennungsluftleitungen bei Berücksichtigung der Nebenluft, in m/s;
- ρ_{B} die Dichte der Verbrennungs- und Nebenluft (siehe 5.11.4), in kg/m^3 ;
- ψ_{BNL} die Rohrreibungszahl der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitung unter Berücksichtigung der Nebenluft;
- $\sum_n \zeta_{\text{B},n}$ die Summe der Widerstandszahlen der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitungen (siehe 5.11.4).

Für die Ermittlung der Rohrreibungszahl für die Lüftungsöffnungen oder die Verbrennungsluftleitung unter Berücksichtigung der Nebenluft ψ_{BNL} gilt 5.10.3.3 entsprechend.

Die Geschwindigkeit in den Lüftungsöffnungen oder den Verbrennungsluftleitungen unter Berücksichtigung der Nebenluft w_{BNL} ergibt sich aus nachfolgender Gleichung:

$$w_{\text{BNL}} = \frac{\beta \cdot \dot{m} + \dot{m}_{\text{NL}}}{A_{\text{B}} \cdot \rho_{\text{B}}} \quad (53)$$

Dabei ist

- A_{B} der Querschnitt der Lüftungsöffnungen oder der Verbrennungsluftleitungen) siehe 5.11.4), in m^2 ;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom vor Nebenluftzumischung, in kg/s;
- \dot{m}_{NL} der Nebenluftmassenstrom, in kg/s;
- β das Verhältnis des Verbrennungsluftmassenstromes zum Abgasmassenstrom (siehe 5.11.4);
- ρ_{B} die Dichte der Verbrennungs- und Nebenluft (siehe 5.11.4), in kg/m^3 .

6.4.2 Notwendiger Förderdruck für die Nebenluftvorrichtung oder die Strömungssicherung (P_{NL})

Der notwendige Förderdruck für die Nebenluftvorrichtung P_{NL} ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$P_{\text{NL}} = a_0 + a_1 \cdot \dot{m}_{\text{NL}} + a_2 \cdot \dot{m}_{\text{NL}}^2 + S_{\text{E}} \cdot (1 + \zeta_{2-3}) \cdot \frac{\rho_{\text{M}}}{2} w_{\text{M}}^2 \quad \text{in Pa} \quad (54)$$

Der notwendige Förderdruck für die Strömungssicherung P_{NL} ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$P_{\text{NL}} = P_{\text{w}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{NL}} + \dot{m}}{m} \right)^2 \quad \text{in Pa} \quad (55)$$

Dabei ist

- a_0 der Einstellwert der Nebenluftvorrichtung, in Pa;
- a_1, a_2 die Kennwerte der Nebenluftvorrichtung (Zugbegrenzer) (siehe Anhang B, Tabelle B.7), in Pa/(kg/s) bzw. Pa/(kg/s)²;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s;
- \dot{m}_{NL} der Nebenluftmassenstrom, in kg/s;
- P_W der notwendige Förderdruck für die Feuerstätte, in Pa;
- S_E die strömungstechnische Sicherheitszahl,
- w_M die Geschwindigkeit des Abgasgemisches nach der Nebenluftbeimischung, in m/s;
- ρ_M die Dichte des Abgasgemisches nach der Nebenluftbeimischung, in kg/m³;
- ζ_{2-3} die Einzelwiderstandszahl für die Nebenlufteinführung, (siehe Tabelle B.7, Nr 5).

Der Einstellwert der Nebenluftvorrichtung a_0 ergibt sich aus der Summe der notwendigen Förderdrücke für die Feuerstätte P_W und für den Abgasweg bis zur Nebenluftvorrichtung.

Für die Nebenluftvorrichtung gilt folgendes:

$$\begin{aligned} \text{— für } P_W + P_{FV1} < 10 & \qquad \qquad \qquad \text{in Pa} & \qquad \qquad \qquad (56) \\ a_0 = 10 & \qquad \qquad \qquad \text{in Pa} \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \text{— für } P_W + P_{FV1} \geq 10 & \qquad \qquad \qquad \text{in Pa} & \qquad \qquad \qquad (57) \\ a_0 = P_W + P_{FV1} & \qquad \qquad \qquad \text{in Pa} \end{aligned}$$

Dabei ist

- P_{FV1} der notwendige Förderdruck für den Abgasweg bis zur Nebenluftvorrichtung, in Pa;
- P_W der notwendige Förderdruck für die Feuerstätte, in Pa;

6.4.3 Notwendiger Förderdruck für den Teil des Verbindungsstückes vor der Nebenluftvorrichtung (P_{FV1})

Der notwendige Förderdruck für den Teil des Verbindungsstückes vor der Nebenluftvorrichtung P_{FV1} ist nach 5.11.2 zu bestimmen.

ANMERKUNG Ist die Nebenluftvorrichtung im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage angeordnet, so kann der Abgasanlagenabschnitt bis zur Nebenluftvorrichtung wie ein Teilabschnitt des Verbindungsstückes behandelt werden. Für die Strömungssicherung gilt $P_{FV1} = 0$.

6.4.4 Druckbedingung für die Nebenluft

Für jeden Nebenluftmassenstrom muss der notwendige Unterdruck an der Abgaseinmündung in den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage P_{ze} bestimmt werden und mit dem Unterdruck an dieser Stelle P_Z verglichen werden.

Die folgende Gleichung muss erfüllt werden:

$$P_Z = P_H - P_R - P_L \geq P_{BNL} + P_{NL} + P_{FV2} = P_{Ze} \quad \text{in Pa} \quad (50)$$

Dabei ist

P_{BNL} der notwendige Förderdruck für die Zuluft bei Nebenluft, in Pa;

P_{FV2} der notwendige Förderdruck für das Verbindungsstück nach der Nebenluftvorrichtung oder der Strömungssicherung, in Pa;

P_H der Ruhedruck der Abgasanlage, in Pa;

P_{NL} der notwendige Förderdruck für die Nebenluftvorrichtung oder die Strömungssicherung, in Pa;

P_R der Widerstandsdruck für den senkrechten Abschnitt der Abgasanlage, in Pa.

Bei Nebenluftvorrichtungen, die im senkrechten Abschnitt der Abgasanlage über der Abgaseinführung angeordnet sind, ist die Druckbedingung nach der Nebenluftvorrichtung nachzuweisen.

6.5 Temperaturbedingung für die Nebenluft

Die Temperaturbedingung an der Mündung der Abgasanlage ist nach 5.8 und 5.12 mit den Stoffwerten für das Abgas-Nebenluft-Gemisch nachzuweisen.

7 Berechnungsverfahren für Luft-Abgasanlagen

7.1 Allgemeine Grundsätze

Die Berechnung der Innenmaße (Querschnitt) von Unterdruck-Abgasanlagen basiert auf den drei folgenden Bedingungen:

- der Unterdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage muss gleich oder größer sein als der erforderliche Unterdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage;
- der Unterdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage muss gleich oder größer sein als der wirksame Förderdruck am Auslass des Zuluftschachtes;
- die Temperatur an der Innenwand an der Mündung der Abgasanlage muss gleich oder höher sein als die Temperaturgrenze.

Die Berechnung der Innenmaße (Querschnitt) von Überdruck-Abgasanlagen basiert auf den drei folgenden Bedingungen:

- der Überdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage muss gleich oder kleiner sein als der größte Druckunterschied an der Abgaseinführung in die Abgasanlage;
- der Überdruck im Verbindungsstück und in der Abgasanlage darf nicht größer sein als der größte für beide geltende Auslegungsüberdruck einschließlich des Druckes der umgebenden Zuluft;
- die Temperatur an der Innenwand an der Mündung der Abgasanlage muss gleich oder höher sein als die Temperaturgrenze.

Zur Überprüfung der Bedingungen werden zwei Kriterien der Umgebungsbedingungen herangezogen:

- bei der Berechnung des Druckes werden die Bedingungen berücksichtigt bei denen die Leistung der Abgasanlagen klein ist (d. h. hohe Außentemperatur); und
- bei der Berechnung der Innenwandtemperatur werden die Bedingungen berücksichtigt, bei denen die Temperatur im Inneren der Abgasanlage niedrig ist (d. h. niedrige Außenlufttemperatur).

Für die Berechnung wird eine Luft-Abgasanlage einschließlich ihres Zuluftschachtes in N_{seg} Segmente von gleicher Länge von jeweils höchstens 0,5 m eingeteilt. Ist der Wärmedurchlasswiderstand zwischen der Abgasanlage (abgasführendes Innenrohr) und dem Zuluftschacht größer als $0,65 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ braucht keine Einteilung in Segmente erfolgen ($N_{seg} = 1$).

Das abgasführende Verbindungsstück und das Verbindungsstück für die Zuluft sind in N_{segV} Segmente des Verbindungsstückes gleicher Länge von höchstens 0,5 m einzuteilen. Ist der Wärmedurchlasswiderstand zwischen dem abgasführenden Verbindungsstück und dem Verbindungsstück für die Zuluft größer als

$0,65 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, braucht keine Einteilung in Segmente zu erfolgen ($N_{seg} = 1$).

7.2 Druckbedingung

Die Gleichungen (1) und (59) für Unterdruck-Abgasanlagen oder (3), (60) und (61) für Überdruck-Abgasanlagen müssen für alle relevanten Betriebsbedingungen erfüllt werden.

$$P_Z \geq P_{RB} + P_{HB} \quad \text{in Pa} \quad (59)$$

$$P_{ZO} \leq P_{Z_{excess}} - (P_{RB} + P_{HB}) \quad \text{in Pa} \quad (60)$$

$$P_{ZO} + P_{FV} \leq P_{ZV_{excess}} - P_B \quad \text{in Pa} \quad (61)$$

Dabei ist

P_Z der Förderdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage, in Pa;

P_{ZO} der Überdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage, in Pa;

P_{RB} der Förderdruck im Zuluftschacht, in Pa;

P_{HB} der Ruhedruck im Zuluftschacht, in Pa;

P_{FV} der wirksame Förderdruck im Verbindungsstück, in Pa;

$P_{Z_{excess}}$ der höchste Auslegungsdruck der Abgasanlage, in Pa;

$P_{ZV_{excess}}$ der höchste Auslegungsdruck des Verbindungsstückes, in Pa.

Der Förderdruck für die Zuluft P_B ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$P_B = P_{RB} + P_{HB} + P_{RBV} + P_{HBV} \quad \text{in Pa} \quad (62)$$

Dabei ist

P_B	der wirksame Förderdruck für die Zuluft, in Pa;
P_{RB}	der Förderdruck im Zuluftschacht, in Pa;
P_{HB}	der Ruhedruck im Zuluftschacht, in Pa;
P_{RBV}	der Förderdruck im Verbindungsstück für die Zuluft, in Pa;
P_{HBV}	der Ruhedruck im Verbindungsstück für die Zuluft, in Pa.

7.3 Temperaturbedingung

Die Gleichungen (6) und (7) müssen erfüllt werden.

7.4 Berechnungsgang

Für die Berechnung der Druck- und Temperaturwerte nach den Gleichungen (1), (3), (6), (59), (60), und (61) müssen die charakteristischen Abgaswerte nach 5.5 für die Feuerstätte vorliegen. Für die Abgasanlage, das Verbindungsstück für das Abgas, den Zuluftschacht und das Verbindungsstück für die Zuluft müssen die Werte nach 7.6 vorliegen. Bei neu zu erstellenden Abgasanlagen sollte ein vorgeschätzter Wert für die Größe der Abgasleitung angesetzt werden.

7.7 bis 7.11 enthalten Rechengänge für den Abschluss der wärme- und strömungstechnischen Berechnungen. In 7.7 sind Gleichungen für die Berechnung von Grundwerten enthalten, die für die weitere Berechnung benötigt werden.

Die Gleichungen für die Berechnung der entsprechenden Temperaturwerte sind in 5.5.3 und 7.8 zusammengestellt. 7.9 enthält Gleichungen zur Berechnung der Dichte des Abgases und der Abgasgeschwindigkeit.

Die Verfahrensweise nach 7.10 und 7.11 ist für die Validierung der Druckbedingung anzuwenden. Die Verfahrensweise nach 7.12 ist für die Validierung der Temperaturbedingung anzuwenden.

Die Validierung der Druck- und Temperaturbedingung ist jeweils bei zwei Betriebszuständen durchzuführen:

- bei Nennwärmeleistung der Feuerstätte und
- beim kleinsten vom Hersteller der Feuerstätte angegebenen Leistungsbereich.

7.5 Abgaskennwerte der Feuerstätte

Die Abgaskennwerte für die Feuerstätte müssen nach 5.5 berechnet werden.

7.6 Kennwerte für die Berechnung

Die Kennwerte müssen nach 5.6 berechnet werden.

Der mittlere Rauigkeitsbeiwert des Zuluftschachtes r_B und des Verbindungsstückes für die Zuluft r_{BV} sollte vom Hersteller der betreffenden Produkte erfragt werden. Mittlere Rauigkeitsbeiwerte von gebräuchlichen Werkstoffen sind in Tabelle B.4 aufgeführt.

Der Wärmedurchlasswiderstand des Zuluftschachtes $(1/A)_B$ und des Verbindungsstückes für die Zuluft $(1/A)_{BV}$ kann für Abgasanlagen nach 5.6.3 ermittelt werden. In Gleichung (10) ist für D_h der innere hydraulische Durchmesser des Zuluftschachtes D_{hB} oder des Verbindungsstückes für die Zuluft D_{hBV} einzusetzen.

7.7 Grundwerte der Berechnung

7.7.1 Lufttemperatur

7.7.1.1 Allgemeines

Bei Abgasanlagen, die durch beheizte Zonen geführt werden, muss unterschieden werden zwischen Außenlufttemperatur und Umgebungslufttemperatur.

7.7.1.2 Außenlufttemperatur (T_L)

Die Überprüfung der Druckbedingung bei einer Außenlufttemperatur T_L wird bei Heizungsanlagen üblicherweise mit 288,15 K ($t_L = 15\text{ °C}$) durchgeführt. Zur Überprüfung der Temperaturbedingung sind die folgenden Werte für die Außenlufttemperatur T_L einzusetzen:

$$T_L = 258,15\text{ K} \quad (t_L = -15\text{ °C}) \text{ für Abgasanlagen mit Nassbetriebsweise;}$$

$$T_L = 273,15\text{ K} \quad (t_L = 0\text{ °C}) \text{ für Abgasanlagen im Trockenbetrieb.}$$

Für T_L dürfen auch anerkannte nationale Daten angewendet werden.

7.7.1.3 Umgebungslufttemperatur (T_u)

Die Überprüfung der Druckbedingung bei Umgebungslufttemperatur wird mit der Annahme $T_u = T_L$ durchgeführt. Zur Überprüfung der Temperaturbedingung sind die folgenden Werte für die Umgebungslufttemperatur T_u einzusetzen:

$$T_{uo} = T_L \quad (t_{uo} = t_L)$$

$$T_{ub} = 288,15\text{ K} \quad (t_{ub} = 15\text{ °C})$$

$$T_{uh} = 293,15\text{ K} \quad (t_{uh} = 20\text{ °C})$$

$$T_{ul} = T_{uo} \quad (t_{ul} = t_{uo})$$

$$T_{uu} = 273,15\text{ K} \quad (t_{uu} = 0\text{ °C})$$

Für T_{uo} dürfen auch anerkannte nationale Daten angewendet werden.

Dabei ist

T_{uo} die Umgebungslufttemperatur an der Mündung der Abgasanlage, in K;

T_{ub} die Umgebungslufttemperatur im Aufstellraum der Feuerstätte, in K;

T_{uh} die Umgebungslufttemperatur in beheizten Zonen, in K;

T_{ul} die Umgebungslufttemperatur für Zonen außerhalb des Gebäudes, in K;

T_{uu} die Umgebungslufttemperatur für unbeheizte Zonen im Gebäude, in K.

7.7.2 Weitere Grundwerte

Weitere Grundwerte sind nach 5.7.2 bis 5.7.6 und 5.7.8 zu bestimmen.

7.8 Ermittlung der Temperaturwerte

7.8.1 Nicht-konzentrische (nebeneinander liegende) Schächte

Ist der Wärmedurchlasswiderstand zwischen Abgasschacht und Zuluftschacht größer als $0,65 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, muss die Ermittlung der Abgastemperaturwerte für nebeneinander liegende Schächte nach Abschnitt 5 durchgeführt werden. Die Zulufttemperatur im Zuluftschacht ist gleich der Außenlufttemperatur anzunehmen.

Andernfalls muss die Ermittlung der Temperaturwerte analog nach 7.8.2 oder 7.8.3 durchgeführt werden.

7.8.2 Konzentrische Schächte – Berechnung basierend auf einem Korrekturfaktor für Wärmestrahlung

7.8.2.1 Allgemeines

Bei konzentrischen Schächten müssen auch die Werte zur Einhaltung der Druckbedingung für die Berechnung der Temperaturbedingung verwendet werden.

Zur Berechnung der Temperaturwerte in einem konzentrischen Schacht ist eine iterative Vorgehensweise notwendig. Es wird empfohlen, mit dem Abschnitt mit dem ersten Verbindungsstück $j = 1$ zu beginnen, indem ein vorgeschätzter Wert der Zulufttemperatur an der Mündung des konzentrischen Verbindungsstückes $T_{\text{obV},1}$ angenommen wird. Dann muss $T_{\text{obV},1}$ mit Gleichungen in 7.8.2 iterativ ermittelt werden bis folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$\left| T_{\text{eB},N\text{seg}} - T_{\text{L}} \right| \leq \varepsilon \quad \text{in K} \quad (63)$$

Dabei ist

$T_{\text{obV},1}$ die Zulufttemperatur an der Mündung des Abschnittes 1 des Verbindungsstückes, in K;

$T_{\text{eB},N\text{seg}}$ die Zulufttemperatur am Lufteintritt in den Abschnitt der Abgasanlage $N\text{seg}$, in K;

T_{L} die Außenlufttemperatur, in K;

T_{uo} die Umgebungslufttemperatur an der Mündung der Abgasanlage, in K;

$N\text{seg}$ die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage, die für die Berechnung gebraucht werden;

ε zusammengefasster größter Fehler in K, der $\leq 1 \text{ K}$ anzusetzen ist.

7.8.2.2 Zuluft- und Abgastemperaturen in den Abschnitten des Verbindungsstückes

Ist der Wärmedurchlasswiderstand im Verbindungsstück zwischen dem Abgas- und dem Zuluft führenden Schacht größer als $0,65 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, muss die Ermittlung der Temperaturwerte für das Verbindungsstück für Abgas und für die Zuluft nach Abschnitt 5 durchgeführt werden. Dann muss die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes $j = N\text{seg}$ $T_{\text{eB},N\text{segV}}$ vorgeschätzt werden und nicht die Temperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes $j = 1$ $T_{\text{obV},1}$ (siehe 7.8.2.1) verwendet werden.

Andernfalls muss die Ermittlung der Abgas- und Zulufttemperaturen im Verbindungsstück wie folgt durchgeführt werden:

Die Abgastemperatur am Eintritt in das Verbindungsstück, d. h. am Anfang des ersten Verbindungsstückes

$j = 1$ $T_{\text{eV},1}$, ist wie folgt zu wählen:

$$T_{\text{eV},1} = T_{\text{W}} \quad \text{in K} \quad (64)$$

Die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes für Abgas $j > 1$ $T_{e,j}$ ist wie folgt zu wählen:

$$T_{eV,j} = T_{oV,j-1} \quad \text{in K} \quad (65)$$

Dabei ist

$T_{eV,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;

T_W die Temperatur am Abgasstutzen der Feuerstätte, in K;

$T_{oV,j}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K.

Die Temperatur der Zuluft am Ende des Segmentes des Verbindungsstückes $j = 1$ $T_{oB,1}$ muss vorgeschätzt werden (siehe 7.8.2.1).

ANMERKUNG 1 Ist vom Hersteller der Feuerstätte eine Höchsteintrittstemperatur für die Zuluft angegeben, kann zusätzlich zur Überprüfung der Temperaturbedingung der Abgasanlage eine Überprüfung der Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes $j = 1$ $T_{oBV,1}$ des Verbindungsstückes für die Zuluft erforderlich werden.

Die Zulufttemperatur der Zuluft am Ende eines Abschnittes eines Verbindungsstückes $j > 1$ $T_{oB,j}$ ist:

$$T_{oBV,j} = T_{eBV,j-1} \quad \text{in K} \quad (66)$$

Dabei ist

$T_{oB,j}$ die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;

$T_{eB,j}$ die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K.

Die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes des konzentrischen Verbindungsstückes für Abgas j $T_{oV,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_{oV,j} = \frac{(2 - K_{V,j}) \cdot (2 - K_{BV,j}) \cdot T_{eV,j} + 2 \cdot K_{V,j} \cdot (E_{V,j} \cdot T_{eV,j} - 2 \cdot T_{oBV,j} + K_{BV,j} \cdot T_{uV,j})}{(2 + K_{V,j}) \cdot (2 - K_{VB,j}) - 2 \cdot K_{V,j} \cdot E_{V,j}} \quad \text{in K} \quad (67)$$

mit

$$E_{V,j} = \frac{\dot{m} \cdot c_{pV,j}}{\dot{m}_B \cdot c_{pBV,j}} \quad (68)$$

Dabei ist

$T_{oV,j}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;

$T_{eV,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;

$T_{oBV,j}$ die Temperatur der Zuluft am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;

$T_{uV,j}$ die Umgebungslufttemperatur des Abschnittes des Verbindungsstückes für Abgas j , in K;

$K_{V,j}$ die Abkühlzahl für den Abschnitt des Verbindungsstückes für Abgas j , in K;

$K_{BV,j}$ die Abkühlzahl für den Abschnitt des Verbindungsstückes für die Zuluft j , in K;

\dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s;

- $c_{pV,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases im Abschnitt des Verbindungsstückes j , in J (kg · K);
- \dot{m}_B der Zuluftmassenstrom, in kg/s;
- $c_{pBV,j}$ die spezifische Wärmekapazität der Zuluft im Abschnitt des Verbindungsstückes j , in J (kg · K);
- $E_{V,j}$ das Verhältnis des Wärmedurchganges zwischen Abgas und Zuluft im Abschnitt des Verbindungsstückes j , in K.

Die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des konzentrischen Verbindungsstückes j $T_{eBV,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_{eBV,j} = T_{eV,j} + T_{oV,j} - T_{oBV,j} - \frac{2}{K_{V,j}}(T_{eV,j} - T_{oV,j}) \quad \text{in K} \quad (69)$$

Dabei ist

- $T_{eBV,j}$ die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;
- $T_{eV,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;
- $T_{oV,j}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;
- $T_{oBV,j}$ die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;
- $K_{V,j}$ die Abkühlzahl für den Abschnitt des Verbindungsstückes j , in K.

ANMERKUNG 2 Die oben aufgeführten Gleichungen basieren auf der Annahme, dass die Wärmeübertragung annähernd anhand der Differenz der mittleren Temperaturen berechnet werden kann.

Die über die Länge des Abschnittes des konzentrischen Verbindungsstückes für Abgas gemittelte Temperatur $T_{mV,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_{mV,j} = \frac{T_{eV,j} + T_{oV,j}}{2} \quad \text{in K} \quad (70)$$

Dabei ist

- $T_{mV,j}$ die über die Länge des Abschnittes des konzentrischen Verbindungsstückes gemittelte Abgastemperatur j , in K;
- $T_{eV,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;
- $T_{oV,j}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;

Die über die Länge des Abschnittes des konzentrischen Verbindungsstückes j gemittelte Zulufttemperatur $T_{mBV,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_{mBV,j} = \frac{T_{eBV,j} + T_{oBV,j}}{2} \quad \text{in K} \quad (71)$$

Dabei ist

$T_{mBV,j}$ die über die Länge des Abschnittes des Verbindungsstückes j gemittelte Zulufttemperatur, in K;

$T_{eBV,j}$ die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K;

$T_{oBV,j}$ die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes j , in K.

7.8.2.3 Abgas- und Zulufttemperaturen in den Abschnitten der Abgas und Zuluft führenden Schächte

Die Abgastemperatur an der Abgaseinführung in die Abgasanlage, d. h. am Anfang des ersten Abschnittes j der Abgasanlage = 1 $T_{e,1}$, ist:

$$T_{e,1} = T_{oV,NsegV} \quad \text{in K} \quad (72)$$

Die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes der Abgasanlage $j > 1$ $T_{e,j}$ ist

$$T_{e,j} = T_{o,j-1} \quad \text{in K} \quad (73)$$

Dabei ist

$T_{e,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes der Abgasanlage j , in K;

$T_{oV,NsegV}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes des Verbindungsstückes $NsegV$, in K;

$T_{o,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes der Abgasanlage j , in K.

Die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des Zuluftschachtes $j = 1$ $T_{oB,1}$ ist

$$T_{oB,1} = T_{eBV,NsegV}$$

Die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des Zuluftschachtes $j > 1$ $T_{oB,j}$ ist:

$$T_{oB,j} = T_{eB,j-1} \quad \text{in K} \quad (75)$$

Dabei ist

$T_{oB,j}$ die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des Zuluftschachtes j , in K;

$T_{eBV,NsegV}$ die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes des Verbindungsstückes $NsegV$, in K;

$T_{eB,j}$ die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes des Zuluftschachtes j , in K

Die Abgastemperatur am Ende des konzentrischen Abschnittes der Abgasanlage j $T_{o,j}$ ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$T_{o,j} = \frac{(2 - K_{,j}) \cdot (2 - K_{B,j}) \cdot T_{e,j} + 2 \cdot K_{,j} \cdot (E_{,j} \cdot T_{e,j} - 2 \cdot T_{oB,j} + K_{B,j} \cdot T_{u,j})}{(2 + K_{,j}) \cdot (2 - K_{B,j}) - 2 \cdot K_{,j} \cdot E_{,j}} \quad \text{in K} \quad (76)$$

mit

$$E_{,j} = \frac{\dot{m} \cdot c_{p,j}}{\dot{m}_B \cdot c_{pB,j}} \quad (77)$$

Dabei ist

- $T_{o,j}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes der Abgasanlage j , in K;
- $T_{e,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes der Abgasanlage j , in K;
- $T_{oB,j}$ die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes des j , in K;
- $T_{u,j}$ die Umgebungslufttemperatur des Abschnittes der Abgasanlage j , in K;
- K_j die Abkühlzahl des Abschnittes im Abgasschacht der Abgasanlage j ;
- $K_{B,j}$ die Abkühlzahl im Abschnitt des Zuluftschachtes j ;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s
- $c_{p,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases im Abschnitt der Abgasanlage j , in J/(kg · K);
- \dot{m}_B der Zuluftmassenstrom in kg/s;
- $c_{pB,j}$ die spezifische Wärmekapazität der Zuluft im Abschnitt des Zuluftschachtes j , in J/(kg · K);
- E_j das Verhältnis des Wärmeüberganges zwischen Abgas und Zuluft im Abschnitt der Abgasanlage j .

Die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes des konzentrischen Zuluftschachtes j $T_{eB,j}$ ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$T_{eB,j} = T_{e,j} + T_{o,j} - T_{oB,j} - \frac{2}{K_j} (T_{e,j} - T_{o,j}) \quad \text{in K} \quad (78)$$

Dabei ist

- $T_{eB,j}$ die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in K;
- $T_{e,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes j der Abgasanlage, in K;
- $T_{o,j}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes j der Abgasanlage, in K;
- $T_{oB,j}$ die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in K;
- K_j die Abkühlzahl des Abschnittes j der Abgasanlage, in K.

ANMERKUNG Die oben aufgeführten Gleichungen basieren auf der Annahme, dass die Wärmeübertragung annähernd anhand der Differenz der mittleren Temperaturen berechnet werden kann.

Die über die Länge des konzentrischen Abschnittes j der Abgasanlage gemittelten Abgastemperaturen $T_{m,j}$ sind nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$T_{m,j} = \frac{T_{e,j} + T_{o,j}}{2} \quad \text{in K} \quad (79)$$

Dabei ist

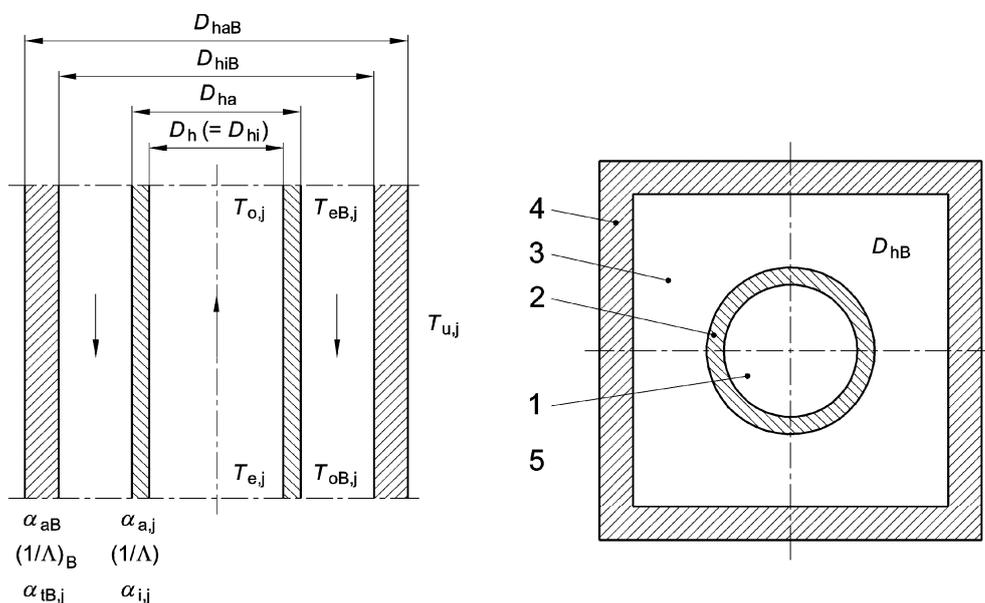
- $T_{m,j}$ die über die Länge des Abschnittes j der Abgasanlage gemittelte Abgastemperatur, in K;
- $T_{e,j}$ die Abgastemperatur am Anfang des Abschnittes j der Abgasanlage, in K;
- $T_{o,j}$ die Abgastemperatur am Ende des Abschnittes j der Abgasanlage, in K.

Die über die Länge des konzentrischen Abschnittes j des Zuluftschachtes gemittelte Zulufttemperatur $T_{mB,j}$ ist nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$T_{mB,j} = \frac{T_{eB,j} + T_{oB,j}}{2} \quad \text{in K} \quad (80)$$

Dabei ist

- $T_{mB,j}$ die über die Länge des Abschnittes j des Zuluftschachtes gemittelte Zulufttemperatur, in K;
- $T_{eB,j}$ die Zulufttemperatur am Anfang des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in K;
- $T_{oB,j}$ die Zulufttemperatur am Ende des Abschnittes j des Zuluftschachtes j , in K.



Legende

- 1 Abgasweg (mit Abgas)
- 2 Abgasschacht
- 3 Zuluftweg (mit Zuluft)
- 4 Zuluftschacht
- 5 Umgebungsluft

Bild 1 — Definition der Symbole für die Berechnung konzentrischer LAS-Systeme

7.8.2.4 Berechnung der Abkühlzahl

Die Abkühlzahl für den Abgasschacht des Abschnittes j für das Verbindungsstück $K_{V,j}$ ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$K_{V,j} = \frac{k_{V,j} \cdot U_V \cdot L_V}{\dot{m} \cdot c_{pV,j} \cdot N_{segV}} \quad (81)$$

Dabei ist

- $K_{V,j}$ die Abkühlzahl für den Abgasschacht des Abschnittes j für das Verbindungsstück;
- $k_{V,j}$ die Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Abgasschacht und der Öffnung für die Zuluftversorgung des Abschnittes j des Verbindungsstückes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- U_V der Umfang des Verbindungsstückes j , in m;
- L_V die Länge des Verbindungsstückes, in m;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s;
- $c_{pV,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases im Abschnitt j des Verbindungsstückes, in $J/(kg \cdot K)$;
- N_{segV} die Anzahl der Abschnitte des Verbindungsstückes.

Die Abkühlzahl im Zuluftschacht des Verbindungsstückes K_{BV} ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$K_{BV,j} = \frac{k_{BV,j} \cdot U_{iBV} \cdot L_{BV}}{\dot{m}_B \cdot c_{pBV,j} \cdot N_{segV}} \quad (82)$$

Dabei ist

- $K_{BV,j}$ die Abkühlzahl im Zuluftschacht des Abschnittes j des Verbindungsstückes;
- $k_{BV,j}$ die Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Zuluft und der Umgebungsluft für den Abschnitt j des Verbindungsstückes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- U_{iBV} der innere Umfang des Zuluftschachtes des Verbindungsstückes, in m;
- L_{BV} die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m;
- \dot{m}_B der Zuluftmassenstrom, in kg/s;
- $c_{pBV,j}$ die spezifische Wärmekapazität der Zuluft im Abschnitt j des Verbindungsstückes, in $J/(kg \cdot K)$;
- N_{segV} die Anzahl der Abschnitte des Verbindungsstückes.

Die Abkühlzahl im Abschnitt j der Abgasanlage K_j ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$K_{j} = \frac{k_j \cdot U \cdot L}{\dot{m} \cdot c_{p,j} \cdot N_{seg}} \quad (83)$$

Dabei ist

- K_j die Abkühlzahl im Abschnitt j der Abgasanlage;
- k_j die Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Abgasschacht und der Öffnung für die Zuluftversorgung des Abschnittes j der Abgasanlage, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- U der Umfang des Abgasschachtes, in m;
- L die Länge des Abschnittes der Abgasanlage, in m;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s;
- $c_{p,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases im Abschnitt j der Abgasanlage, in $J/(kg \cdot K)$;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage.

Die Abkühlzahl $K_{B,j}$ im Abschnitt j des Zuluftschachtes ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$K_{B,j} = \frac{k_{B,j} \cdot U_{iB} \cdot L_B}{\dot{m}_B \cdot c_{pB,j} \cdot N_{seg}} \quad (84)$$

Dabei ist

- $K_{B,j}$ die Abkühlzahl im Abschnitt j des Zuluftschachtes der Abgasanlage;
- $k_{B,j}$ die Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Zuluft und Umgebungsluft des Abschnittes j der Abgasanlage, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- U_{iB} der innere Umfang des Zuluftschachtes, in m;
- L_B die Länge des Zuluftschachtes, in m;
- \dot{m}_B der Zuluftmassenstrom, in kg/s;
- $c_{pB,j}$ die spezifische Wärmekapazität der Zuluft im Abschnitt j der Abgasanlage, in $J/(kg \cdot K)$;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage.

7.8.2.5 Wärmedurchgangskoeffizient

7.8.2.5.1 Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Abgas und der Zuluft im konzentrischen Verbindungsstück ($k_{V,j}$)

Der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Abgas und Zuluft im Abschnitt j in der Zuluftführung des Verbindungsstückes $k_{V,j}$ ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$k_{V,j} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iV,j}} + \left(\frac{1}{A}\right)_V + \frac{D_{hV}}{D_{haV} \cdot \alpha_{aV,j} \cdot S_{rad}}} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (85)$$

Dabei ist

- $k_{V,j}$ der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Abgas und Zuluft im Abschnitt j des Verbindungsstückes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\left(\frac{1}{A}\right)_V$ der Wärmedurchlasswiderstand des Abgasschachtes des Verbindungsstückes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- D_{hV} der hydraulische Durchmesser des Abgasschachtes des Verbindungsstückes, in m;
- D_{haV} der äußere hydraulische Durchmesser des Abgasschachtes des Verbindungsstückes, in m;
- $\alpha_{iV,j}$ der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Abgas und innerer Oberfläche des Abgasrohres des Abschnittes j des Verbindungsstückes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\alpha_{aV,j}$ der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Zuluft und der äußeren Oberfläche des Abgasrohres des Abschnittes j des Verbindungsstückes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- S_{rad} der Korrekturfaktor für Wärmestrahlung.

Um die Einflüsse der Wärmestrahlung von der äußeren Oberfläche des Abgasschachtes zur inneren Oberfläche des Zuluftschachtes des konzentrischen Verbindungsstückes berücksichtigen zu können, wird bei der Berechnung von $k_{V,j}$ ein Korrekturfaktor für Wärmestrahlung S_{rad} , der den Wert 2 hat, verwendet.

Bei konzentrischen Verbindungsstücken, bei denen die Innenwandtemperatur des Abgasschachtes immer niedriger ist als die Kondensationstemperatur des Abgases sollte für $S_{\text{rad}} = 1$ eingesetzt werden.

Der Wärmeübergangskoeffizient im Verbindungsstück $\alpha_{iV,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\alpha_{iV,j} = \frac{\lambda_{AV,j} \cdot Nu_{V,j}}{D_{hV}} \quad \text{in W/(m}^2 \text{ K)} \quad (86)$$

Dabei ist

D_{hV} der innere hydraulische Durchmesser des Abschnittes j des abgasführenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;

$Nu_{V,j}$ die Nusselt-Zahl für den Abschnitt j des abgasführenden Teiles des Verbindungsstückes;

$\lambda_{AV,j}$ die Wärmeleitfähigkeit des Abgases im Abschnitt j des Verbindungsstückes, in W/(m · K).

Die Wärmeleitfähigkeit des Abgases λ_{AV} wird unter Berücksichtigung der mittleren Abgastemperatur im Abschnitt j des Verbindungsstückes nach den Gleichungen im Anhang B, Tabellen B.1 und B.8, berechnet.

Die mittlere Nusselt-Zahl $Nu_{V,j}$, gemittelt über die Länge des Abschnittes j des konzentrischen Verbindungsstückes, wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Nu_{V,j} = \left(\frac{\psi_{V,j}}{\psi_{\text{smoothV},j}} \right)^{0,67} \cdot 0,0214 \cdot (Re_{V,j}^{0,8} - 100) \cdot Pr_{V,j}^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_{hV}}{L_{\text{totV}}} \right)^{0,67} \right] \quad (87)$$

Dabei ist

D_{hV} der innere hydraulische Durchmesser des abgasführenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;

L_{totV} die gesamte Länge des Verbindungsstückes vom Abgasstutzen der Feuerstätte bis zur Abgaseinführung in die Abgasanlage, in m;

$Pr_{V,j}$ die Prandtl-Zahl;

$Re_{V,j}$ die Reynolds-Zahl;

$\psi_{V,j}$ die Widerstandszahl infolge Reibung bei hydraulischer starker Strömung (siehe 7.10.3.3);

$\psi_{\text{smoothV},j}$ die Widerstandszahl infolge Reibung bei hydraulisch laminarer Strömung (7.10.3.3 für $r = 0$).

Die Gleichung gilt für $2\,300 < Re_{V,j} < 10\,000\,000$ und $\left(\frac{\psi_{V,j}}{\psi_{\text{smoothV},j}} \right) < 3$ als auch für $0,6 < Pr_{V,j} < 1,5$.

Bei mittlerer Abgasgeschwindigkeit $w_{mV,j} < 0,5$ m/s, ist die Nusselt-Zahl für $w_{mV,j} = 0,5$ m/s einzusetzen.

Für Reynolds-Zahlen unter 2 300 ist die Nusselt-Zahl für $Re_{V,j} = 2\,300$ einzusetzen.

Die Prandtl-Zahl $Pr_{V,j}$ ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$Pr_{V,j} = \frac{\eta_{AV,j} \cdot c_{pV,j}}{\lambda_{AV,j}} \quad (—) \quad (88)$$

Die Reynolds-Zahl $Re_{V,j}$ ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$Re_{V,j} = \frac{w_{mV,j} \cdot D_{hV} \cdot \rho_{mV,j}}{\eta_{AV,j}} \quad (—) \quad (89)$$

Dabei ist

- $c_{pV,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases, in J/(kg · K);
- D_{hV} der innere hydraulische Durchmesser des abgasführenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
- $w_{mV,j}$ die mittlere Abgasgeschwindigkeit (siehe 7.9.1), in m/s;
- $\eta_{AV,j}$ die dynamische Viskosität des Abgases, in N · s/m²;
- $\lambda_{AV,j}$ die Wärmeleitfähigkeit des Abgases, in W/(m · K);
- $\rho_{mV,j}$ die mittlere Dichte des Abgases (siehe 7.9.1), in kg/m³.

Die dynamische Viskosität $\eta_{AV,j}$ wird unter Berücksichtigung der Abgastemperatur mittels der Gleichungen B.10 in Anhang B, Tabelle B.1 berechnet.

Der innere Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{iV,j}$ kann auch wie aufgeführt für Abgasanlagen im Nassbetrieb berechnet werden, wenn die Kondensationswärmegewinne nicht berücksichtigt werden.

$\alpha_{aV,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\alpha_{aV,j} = \frac{\lambda_{BV,j} \cdot Nu_{aV,j}}{D_{hBV}} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (90)$$

mit

$$D_{hBV} = \frac{4 \cdot A_{BV}}{U_{aV} + U_{iBV}} \quad \text{in m} \quad (91)$$

$$Nu_{aV,j} = 0,86 \cdot \left(\frac{D_{hBV}}{D_{hVa}} \right)^{0,16} \cdot Nu_{BV,j} \quad (92)$$

und

$$Nu_{BV,j} = \left[\frac{\psi_{BV,j}}{\psi_{smoothBV,j}} \right]^{0,67} \cdot 0,0214 \cdot \left(Re_{BV,j}^{0,8} - 100 \right) \cdot Pr_{BV,j}^{0,4} \cdot \left(1 + \frac{D_{hBV}}{L_{totBV}} \right)^{0,67} \quad (93)$$

$$Re_{BV,j} = \frac{w_{mBV,j} \cdot D_{hBV} \cdot \rho_{mBV,j}}{\eta_{BV,j}} \quad (94)$$

Dabei ist

- $\lambda_{BV,j}$ die Wärmeleitfähigkeit der Zuluft im Abschnitt j des konzentrischen Verbindungsstückes für die Zuluft, in W/(m · K);
- $Nu_{aV,j}$ die Nusselt-Zahl für die Außenseite des Abgasschachtes des konzentrischen Verbindungsstückes für die Zuluft;
- D_{hBV} der hydraulische Durchmesser des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
- A_{BV} die Querschnittsfläche des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m²;
- D_{hVai} der hydraulische Durchmesser an der Außenseite des Abgas führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;

U_{iBV}	der Umfang der Innenseite des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
U_{aVi}	der Umfang auf der Außenseite des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
Nu_{BVj}	die Nusselt-Zahl für einen Referenzabgasmassenstrom für den Abschnitt j des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes;
ψ_{BVj}	die größere Widerstandszahl infolge Reibung an der Innenseite des Zuluftschachtes und der äußeren Seite des Abschnittes j des abgasführenden Teiles des Verbindungsstückes;
$\psi_{smoothBVj}$	die Widerstandszahl infolge Reibung des Abschnittes j des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes für hydraulisch laminare Strömung;
Re_{BVj}	die Reynolds-Zahl des Abschnittes j im zuluftführenden Teil des Verbindungsstückes;
Pr_{BVj}	die Prandtl-Zahl des Abschnittes j im zuluftführenden Teil des Verbindungsstückes;
L_{totBV}	die gesamte Länge des zuluftführenden Teiles des Verbindungsstückes vom Auslass des senkrechten Abschnittes der Zuluftzuführung bis zum Eintritt der Zuluft in die Feuerstätte, in m;
w_{mBVj}	die mittlere Geschwindigkeit der Zuluft im Abschnitt j des Verbindungsstückes (siehe 7.9.2), in m/s;
ρ_{mBVj}	die mittlere Dichte der Zuluft im Abschnitt j des Verbindungsstückes, in kg/m^3 ;
η_{BVj}	die dynamische Viskosität der Zuluft im Abschnitt j des Verbindungsstückes j , $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$.

7.8.2.5.2 Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Zuluft und der Umgebungsluft für konzentrische Verbindungsstücke ($k_{BV,j}$)

Der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Zuluft und Umgebungsluft für konzentrische Verbindungsstücke $k_{BV,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$k_{BV,j} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iBV,j}} + \left(\frac{1}{\lambda}\right)_{BV} + \frac{D_{hiBV}}{D_{haBV} \cdot \alpha_{aBV,j}}} \quad \text{in } \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (95)$$

Dabei ist

$k_{BV,j}$	der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Zuluft und Umgebungsluft für den Abschnitt j des Verbindungsstückes, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
$\alpha_{iBV,j}$	der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Zuluft und der inneren Oberfläche des Zuluftschachtes des Abschnittes j des Verbindungsstückes, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
$\left(\frac{1}{\lambda}\right)_{BV}$	der Wärmedurchlasswiderstand des Teiles für die Zuluft des Verbindungsstückes, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
D_{hiBV}	der hydraulische Durchmesser der Innenseite des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
D_{haBV}	der hydraulische Durchmesser auf der Außenseite des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
$\alpha_{aBV,j}$	der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Außenseite des Abschnittes j des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes und der Umgebungsluft, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

$\alpha_{iVB,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\alpha_{iBV,j} = \frac{\lambda_{BV,j} \cdot Nu_{iBV,j}}{D_{hBV}} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (96)$$

mit

$$Nu_{iBV,j} = \left[1 - 0,14 \cdot \left(\frac{D_{haV}}{D_{hiB}} \right)^{0,6} \right] \cdot Nu_{BV,j} \quad (97)$$

D_{hBV} nach Gleichung (91) und $Nu_{BV,j}$ nach Gleichung (93).

Dabei ist

- $\lambda_{BV,j}$ die Wärmeleitfähigkeit der Zuluft im Abschnitt j des Verbindungsstückes, in $W/(m \cdot K)$;
- $Nu_{BV,j}$ die Nusselt-Zahl für einen Referenz-Zuluftmassenstrom im Abschnitt j des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes;
- $Nu_{iBV,j}$ die Nusselt-Zahl auf der Innenseite des Abschnittes j des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes;
- D_{hBV} der hydraulische Durchmesser des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
- D_{hiBV} der hydraulische Durchmesser auf der Innenseite des Zuluft führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m;
- D_{haV} der hydraulische Durchmesser an der Außenseite des Abgas führenden Teiles des Verbindungsstückes, in m.

7.8.2.5.3 Wärmedurchgangskoeffizient (k_j) am Übergang zwischen Zuluftschacht und Abgasschacht bei konzentrischer Anordnung der Schächte

Der Wärmedurchgangskoeffizient k_j (siehe Bild 1) am Übergang zwischen Zuluftschacht und Abgasschacht wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$k_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{i,j}} + \left(\frac{1}{\lambda} \right) + \frac{D_h}{D_{ha} \cdot \alpha_{a,j} \cdot S_{rad}}} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (98)$$

Dabei ist

- k_j der Wärmedurchgangskoeffizient am Übergang zwischen Zuluftschacht des Abschnittes j der Abgasanlage und dem Abgasschacht, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\alpha_{i,j}$ innerer Wärmeübergangskoeffizient zwischen Abgas und der inneren Oberfläche des Abgasschachtes des Abschnittes j der Abgasanlage, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\alpha_{a,j}$ der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Zuluft und der äußeren Oberfläche des Abschnittes j des Abgasschachtes der Abgasanlage, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- D_h der hydraulische Durchmesser des Abgasschachtes, in m;
- D_{ha} der hydraulische Durchmesser der Außenseite des Abgasschachtes, in m;
- $\left(\frac{1}{\lambda} \right)$ der Wärmedurchlasswiderstand des Abgasschachtes, in $(m^2 \cdot K)/W$;
- S_{rad} der Korrekturfaktor für Wärmestrahlung von der äußeren Oberfläche des Abgasschachtes zur inneren Oberfläche des Zuluftschachtes.

Die Einwirkung der Wärmestrahlung von der äußeren Oberfläche des Abgasschachtes auf die innere Oberfläche des Zuluftschachtes wird dadurch berücksichtigt, dass der Wärmedurchgangskoeffizient k_j mit einem Korrekturfaktor S_{rad} für Wärmestrahlung multipliziert wird, der den Wert 2 hat.

In Abschnitten der Abgasanlage in denen die Innenwandtemperatur des Abgasschachtes stets kleiner als die Taupunkttemperatur des Abgases ist, sollte $S_{\text{rad}} = 1$ eingesetzt werden.

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{i,j}$ für den Abschnitt j der Abgasanlage wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\alpha_{i,j} = \frac{\lambda_{A,j} \cdot Nu_j}{D_h} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (99)$$

Dabei ist

- D_h der innere hydraulische Durchmesser des Abgasschachtes, in m;
- Nu_j die Nusselt-Zahl im Abschnitt j der Abgasanlage;
- $\lambda_{A,j}$ die Wärmeleitfähigkeit des Abgases im j Abschnitt der, in W/(m · K).

Die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{A,j}$ des Abgases wird anhand der mittleren Abgastemperatur nach den Gleichungen des Anhangs B, Tabellen B.1 und B.8, berechnet.

Die mittlere Nusselt-Zahl Nu_j gemittelt über die Höhe der Abgasanlage wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Nu_j = \left(\frac{\psi_{,j}}{\psi_{\text{smooth},j}} \right)^{0,67} \cdot 0,0214 \cdot (Re_j^{0,8} - 100) \cdot Pr_{,j}^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{L_{\text{tot}}} \right)^{0,67} \right] \quad (100)$$

Dabei ist

- D_h der innere hydraulische Durchmesser des Querschnittes des Abgasschachtes, in m;
- L_{tot} die gesamte Länge von der Abgaseinführung in die Abgasanlage zum Austritt aus der Abgasanlage, in m;
- $Pr_{,j}$ die Prandtl-Zahl des Abgases im Abschnitt j der Abgasanlage;
- Re_j die Reynolds-Zahl des Abgases im Abschnitt j der Abgasanlage;
- $\psi_{,j}$ die Widerstandszahl infolge Reibung bei hydraulisch starker Strömung im Abschnitt j der Abgasanlage (siehe 7.10.2.2);
- $\psi_{\text{smooth},j}$ die Widerstandszahl infolge Reibung bei laminarer Strömung im Abschnitt j der Abgasanlage (siehe 7.10.2.2 für $r = 0$).

Die Gleichung gilt für Reynoldszahlen von $2\,300 < Re_j < 10\,000\,000$ und $\left(\frac{\psi_{,j}}{\psi_{\text{smooth},j}} \right) < 3$ auch für Prandtlzahlen von $0,6 < Pr_j < 1,5$.

Für mittlere Abgasgeschwindigkeiten von $w_{m,j} < 0,5$ m/s ist die Nusselt-Zahl entsprechend $w_{m,j} = 0,5$ m/s einzusetzen.

Für Reynoldszahlen unter 2 300 ist die Nusselt-Zahl entsprechend der Reynolds-Zahl $Re_j = 2\,300$ einzusetzen.

Die Prandtl-Zahl Pr_j wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Pr_j = \frac{\eta_{A,j} \cdot c_{p,j}}{\lambda_{A,j}} \quad (—) \quad (101)$$

Die Reynolds-Zahl Re wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Re_j = \frac{w_{m,j} \cdot D_h \cdot \rho_{m,j}}{\eta_{A,j}} \quad (—) \quad (102)$$

Dabei ist

- $c_{p,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases im Abschnitt j der Abgasanlage, in J/(kg · K);
- D_h der innere hydraulische Durchmesser des Abgasschachtes, in m;
- $w_{m,j}$ die mittlere Abgasgeschwindigkeit im Abschnitt j der Abgasanlage (siehe 7.9.3), in m/s;
- $\eta_{A,j}$ die dynamische Viskosität im Abschnitt j der Abgasanlage, in N · s/m²;
- $\lambda_{A,j}$ die Wärmeleitfähigkeit des Abgases im Abschnitt j der Abgasanlage, in W/(m · K);
- $\rho_{m,j}$ die mittlere Dichte des Abgases im Abschnitt j der Abgasanlage (siehe 7.9.3), in kg/m³.

Die dynamische Viskosität $\eta_{A,j}$ wird in Abhängigkeit von der Abgastemperatur nach Gleichung B.10 im Anhang B, Tabelle B.1 berechnet.

Der innere Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{i,j}$ kann auch für Abgasanlagen, die für nasse Betriebsweise vorgesehen sind, berechnet werden, wenn die Kondensationswärmegewinne nicht berücksichtigt werden sollen.

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{a,j}$ von der Zuluft und der äußeren Oberfläche des abgasführenden Schachtes im Abschnitt j der Abgasanlage wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\alpha_{a,j} = \frac{\lambda_{B,j} \cdot Nu_{a,j}}{D_{hB}} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (103)$$

mit

$$D_{hB} = \frac{4 \cdot A_B}{U_a + U_{iB}} \quad \text{in m} \quad (104)$$

$$Nu_{a,j} = 0,86 \cdot \left(\frac{D_{hB}}{D_{ha}} \right)^{0,16} \cdot Nu_{B,j} \quad (—) \quad (105)$$

und

$$Nu_{B,j} = \left(\frac{\psi_{B,j}}{\psi_{smoothB,j}} \right)^{0,67} \cdot 0,0214 \cdot (Re_{B,j}^{0,8} - 100) \cdot Pr_{B,j}^{0,4} \cdot \left(1 + \frac{D_{hB}}{L_{Btot}} \right)^{0,67} \quad (—) \quad (106)$$

mit

$$Re_{B,j} = \frac{w_{mB,j} \cdot D_{hB} \cdot \rho_{mB,j}}{\eta_{B,j}} \quad - \quad (107)$$

Dabei ist

$\alpha_{a,j}$	der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Zuluft und äußerer Oberfläche des abgasführenden Schachtes des Abschnittes j der Abgasanlage, $W/(m^2 \cdot K)$;
$\lambda_{B,j}$	die Wärmeleitfähigkeit der Zuluft im Abschnitt j der Abgasanlage, $W/(m \cdot K)$;
$Nu_{a,j}$	die Nusselt-Zahl für die äußere Oberfläche des abgasführenden Schachtes im Abschnitt j der Abgasanlage;
D_{hB}	der hydraulische Durchmesser des Zuluftschachtes, in m;
A_B	die Querschnittsfläche des Zuluftschachtes, in m^2 ;
U_{iB}	der Umfang auf der Innenseite des Zuluftschachtes, in m;
U_a	der Umfang auf der Außenseite des Zuluftschachtes, in m;
D_{ha}	der hydraulische Durchmesser der Außenseite des abgasführenden Schachtes, in m;
$Nu_{B,j}$	die Nusselt-Zahl bei einem Referenzmassenstrom;
$\psi_{B,j}$	der höhere Wert der Widerstandszahl infolge innerer Reibung auf der Innenseite des Abschnittes j des Zuluftschachtes und auf der Außenseite des Abschnittes j des Abgasschachtes;
$\psi_{smoothB,j}$	die Widerstandszahl infolge innerer Reibung der Zuluft für laminare Strömung im Abschnitt j des Zuluftschachtes;
$Re_{B,j}$	die Reynolds-Zahl der Zuluft im Abschnitt j des Zuluftschachtes;
$Pr_{B,j}$	die Prandtl-Zahl der Zuluft im Abschnitt j des Zuluftschachtes;
L_{Btot}	die gesamte Länge des senkrechten Zuluftschachtes vom Einlass der Zuluft von der Außenluft bis zum Einlass der Zuluft in das Verbindungsstück für die Zuluft, in m;
$w_{mB,j}$	die mittlere Geschwindigkeit der Zuluft im Abschnitt j des Zuluftschachtes, in m/s;
$\rho_{mB,j}$	die Dichte der Zuluft gemittelt über die Länge des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in kg/m^3 ;
$\eta_{B,j}$	die dynamische Viskosität der Zuluft im Abschnitt j des Zuluftschachtes, in $m^2 \cdot s$.

7.8.2.5.4 Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Zuluft und Umgebungsluft für konzentrische Schächte ($k_{B,j}$)

Der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Zuluft und Umgebungsluft für konzentrische Schächte ($k_{B,j}$) wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$k_{B,j} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iB,j}} + \left(\frac{1}{\lambda}\right)_B + \frac{D_{hiB}}{D_{haB} \cdot \alpha_{aB,j}}} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (108)$$

Dabei ist

- $k_{B,j}$ der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Zuluft und Umgebungsluft im Abschnitt j der Abgasanlage, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\alpha_{iB,j}$ der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Zuluft und der inneren Oberfläche des Zuluftschachtes des Abschnittes j der Abgasanlage, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\left(\frac{1}{\lambda}\right)_B$ der Wärmedurchlasswiderstand des Zuluftschachtes, in $(m^2 \cdot K)/W$;
- D_{haB} der hydraulische Durchmesser der äußeren Oberfläche des Zuluftschachtes, in m;
- D_{hiB} der hydraulische Durchmesser der inneren Oberfläche des Zuluftschachtes, in m;
- $\alpha_{aB,j}$ der Wärmeübergangskoeffizient an der äußeren Oberfläche des Zuluftschachtes zur Umgebungsluft, in $W/(m^2 \cdot K)$.

$\alpha_{iB,j}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\alpha_{iB,j} = \frac{\lambda_{B,j} \cdot Nu_{iB,j}}{D_{hB}} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (109)$$

mit

$$Nu_{iB,j} = \left[1 - 0,14 \cdot \left(\frac{D_{ha}}{D_{hiB}} \right)^{0,6} \right] \cdot Nu_{B,j} \quad (110)$$

und D_{hB} nach Gleichung (104) und $Nu_{B,j}$ nach Gleichung (106).

Dabei ist

- $\lambda_{B,j}$ die Wärmeleitfähigkeit der Zuluft im Abschnitt j des Zuluftschachtes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $Nu_{iB,j}$ die Nusselt-Zahl der inneren Oberfläche des Abschnittes j des Zuluftschachtes j ;
- $Nu_{B,j}$ die Nusselt-Zahl für einen Referenzmassenstrom;
- D_{hB} der hydraulische Durchmesser im Zuluftschacht, in m;
- D_{hiB} der hydraulische Durchmesser auf der Innenseite des Zuluftschachtes, in m;
- D_{ha} der hydraulische Durchmesser auf der äußeren Oberfläche des Abgasschachtes, in m.

7.8.3 Konzentrische Schächte – Berechnung aufgrund von Wärmestrahlung

7.8.3.1 Allgemeines

Bei der Berechnung des Wärmeübergangs aufgrund eines genormten Korrekturfaktors für Wärmestrahlung zwischen der äußeren Oberfläche des Abgasschachtes und der inneren Oberfläche des Zuluftschachtes wird nur die Strahlung für einen bestimmten Temperaturbereich und für einen bestimmten Bereich von Abgasgeschwindigkeiten berücksichtigt. Wenn die Berechnung insbesondere nicht nur für die Querschnittsermittlung der Abgasanlage angestellt wird, sondern auch für die Ermittlung des Wärmeübergangs zur Zuluft oder zu angrenzenden Räumen, ist es erforderlich, die Berechnung mit einem höheren Genauigkeitsgrad durchzuführen. In diesen Fällen ist es erforderlich, die Temperaturen in der Abgasschacht und im Zuluftschacht mit einem Berechnungsverfahren zu berechnen, welches die Wärmeübergänge infolge Wärmestrahlung genauer berücksichtigen kann.

Im folgenden Abschnitt ist dafür ein Berechnungsverfahren angegeben. Grundsätzlich ist es möglich, das Gleichungssystem, das die Abläufe des Wärmeübergangs in der Abgasanlage durch Berücksichtigung der Wärmestrahlung beschreibt, wie nach 7.8.2 dafür anzuwenden, wobei dabei die Abgastemperatur $T_{o,j}$ am Ende eines Abschnittes j der Abgasanlage und am Ende eines Abschnittes j des Zuluftschachtes $T_{oB,j}$ als Lösung erscheint. Da das Gleichungssystem in diesem Fall weitaus komplexer ist als im Fall einer Berechnung aufgrund eines genormten Korrekturfaktors für Wärmestrahlung, sind auch die Ergebnisse weitaus komplexer als nach 7.8.2. Eine Lösung des Gleichungssystems in dieser Norm anzugeben, wird als nicht praktikabel erachtet, dafür soll nur das Gleichungssystem angegeben werden und es dem Anwender der Norm überlassen werden, das Gleichungssystem mit üblichen mathematischen Methoden zu lösen. Üblicherweise dient die Lösung des Gleichungssystems dazu, die Abgastemperaturen und die Zulufttemperaturen wie nach 7.8.2 zu ermitteln. Es ist danach auch möglich, Lösungen für verschiedene Wärmeübergangsfälle zu berechnen, insbesondere den Wärmeübergang von dem abgasführenden Teil zum zuluftführenden Teil und vom zuluftführenden Teil zu den angrenzenden Räumen.

7.8.3.2 Gleichungssystem

Zur Berechnung der Abgastemperatur in den Abschnitten der Abgasanlage und der Abschnitte des Verbindungsstückes und der entsprechenden Zulufttemperaturen ist das folgende Gleichungssystem mit 15 Gleichungen mit den Unbekannten $q_{C,j}$, $q_{a,j}$, $q_{iB,j}$, $q_{B,j}$, $q_{u,j}$, $q_{rad,j}$, $T_{m,j}$, $T_{o,j}$, $T_{ma,j}$, $T_{mB,j}$, $T_{eB,j}$ (oder $T_{oB,j}$ abhängig von der Art der Iteration), $T_{miB,j}$, $k^*_{i,j}$, $k^*_{iB,j}$, $\alpha_{Rad,j}$ zu lösen.

Der Wärmestrom $q_{C,j}$ vom Abgas führenden Schacht zur äußeren Oberfläche der Abgasanlage wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_{C,j} = \frac{U \cdot L}{\left[\frac{1}{\alpha_{i,j}} + \left(\frac{1}{A} \right) \right] \cdot N_{seg}} \cdot (T_{m,j} - T_{ma,j}) \quad \text{in W} \quad (111)$$

Dabei ist

- U der innere Umfang der Abgasanlage, in m;
- L die Länge der Abgasanlage, in m;
- $T_{m,j}$ die mittlere Temperatur des Abgases im Abschnitt j , in K;
- $T_{ma,j}$ die mittlere Temperatur der äußeren Oberfläche des Abschnittes j der Abgasanlage, in K;
- $\alpha_{i,j}$ der innere Wärmeübergangskoeffizient im Abschnitt j des Abgas führenden Schachtes (siehe Gleichung (99)), in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\left(\frac{1}{A} \right)$ der Wärmedurchlasswiderstand der Abgasanlage, in $m^2 \cdot K/W$;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage, die in der Berechnung berücksichtigt werden.

$$q_{C,j} = \dot{m} \cdot c_{p,j} \cdot (T_{e,j} - T_{o,j}) \quad \text{in W} \quad (112)$$

Dabei ist

- \dot{m} der Abgasmassenstrom, in kg/s;
- $c_{p,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases im Abschnitt j , in $J/(kg \cdot K)$;
- $T_{e,j}$ die Abgastemperatur am Eintritt in den Abschnitt j der Abgasanlage, in K;
- $T_{o,j}$ die Abgastemperatur am Austritt aus dem Abschnitt j der Abgasanlage, in K.

Der Wärmestrom $q_{a,j}$ von der äußeren Oberfläche des Abgas führenden Teiles der Abgasanlage zur Zuluft wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_{a,j} = \frac{U_a \cdot L \cdot \alpha_{a,j}}{N_{seg}} \cdot (T_{ma,j} - T_{mB,j}) \quad \text{in W} \quad (113)$$

Dabei ist

- U_a der äußere Umfang der Abgasanlage, in m;
- L die Länge der Abgasanlage, in m;
- $\alpha_{a,j}$ der innere Wärmeübergangskoeffizient der Zuluft im Abschnitt j (auf der Seite des Abgas führenden Schachtes), in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $T_{ma,j}$ die mittlere Temperatur der Außenseite des Abschnittes j des Abgas führenden Teiles der Abgasanlage, in K;
- $T_{mB,j}$ die mittlere Temperatur der Zuluft im Abschnitt j , in K;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage, die in der Berechnung benötigt wird.

Der Wärmestrom $q_{iB,j}$ von der Zuluft zur inneren Oberfläche des Zuluftschahtes wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_{iB,j} = \frac{U_{iB} \cdot L \cdot \alpha_{iB,j}}{N_{seg}} \cdot (T_{mB,j} - T_{miB,j}) \quad \text{in W} \quad (114)$$

Dabei ist

- U_{iB} der innere Umfang des Zuluftschahtes, in m;
- L die Länge der Abgasanlage, in m;
- $\alpha_{iB,j}$ der innere Wärmeübergangskoeffizient der Zuluft im Abschnitt j (auf der Seite des Zuluftschahtes), in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $T_{mB,j}$ die mittlere Temperatur der Zuluft im Abschnitt j , in K;
- $T_{miB,j}$ die mittlere Temperatur der Innenwand des Abschnittes j des Zuluftschahtes, in K;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage, die in der Berechnung berücksichtigt werden.

Der Wärmestrom $q_{B,j}$ zur Zuluft im Abschnitt j wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_{B,j} = \dot{m}_B \cdot c_{pB,j} \cdot (T_{oB,j} - T_{eB,j}) \quad \text{in W} \quad (115)$$

Dabei ist

- \dot{m}_B der Zuluftmassenstrom, in kg/s;
- $c_{pB,j}$ die spezifische Wärmekapazität der Zuluft im Abschnitt j , in $J/(kg \cdot K)$;
- $T_{oB,j}$ die Temperatur am Auslass des Abschnittes j des Zuluftschahtes, in K;
- $T_{eB,j}$ die Temperatur am Einlass des Abschnittes j des Zuluftschahtes, in K.

Der Wärmestrom $q_{u,j}$ von der Innenwand des Zuluftschachtes zur Umgebungsluft wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_{u,j} = \frac{U_{iB} \cdot L}{\left[\left(\frac{1}{\Lambda} \right)_B + \frac{D_{hiB}}{D_{haB} \cdot \alpha_{aB,j}} \right] \cdot Nseg} \cdot (T_{miB,j} - T_{u,j}) \quad \text{in W} \quad (116)$$

Dabei ist

- U_{iB} der innere Umfang des Zuluftschachtes, in m;
- L die Länge der Abgasanlage, in m;
- $T_{miB,j}$ die mittlere Temperatur der Innenwand des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in K;
- $T_{u,j}$ die Umgebungslufttemperatur am Abschnitt j , in K;
- $\left(\frac{1}{\Lambda} \right)_B$ der Wärmedurchlasswiderstand des Zuluftschachtes, in $(m^2 \cdot K)/W$;
- D_{hiB} der hydraulische Durchmesser der Innenwand des Zuluftschachtes, in m;
- D_{haB} der hydraulische Durchmesser der Außenwand des Zuluftschachtes, in m;
- $\alpha_{aB,j}$ der äußere Wärmeübergangskoeffizient des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $Nseg$ die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage, die in der Berechnung berücksichtigt werden.

Der Wärmestrom infolge Strahlung q_{rad} wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_{Rad,j} = \frac{U_a \cdot L \cdot \sigma_{Rad,j}}{\left[\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{D_{ha}}{D_{hiB}} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{iB}} - 1 \right) \right] \cdot Nseg} \cdot (T_{ma,j}^4 - T_{miB,j}^4) \quad \text{in W} \quad (117)$$

Dabei ist

- U_a der äußere Umfang der Abgasanlage, in m;
- L die Länge der Abgasanlage, in m;
- $T_{ma,j}$ die mittlere Temperatur an der Außenwand des Abschnittes j der Abgasanlage, in K;
- $T_{miB,j}$ die mittlere Temperatur der Innenwand des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in K;
- σ_{Rad} die Strahlung des schwarzen Körpers $\sigma_{Rad} = 5,67 \cdot 10^{-8}$, in $W/(m^2 \cdot K^4)$;
- ϵ_a das Verhältnis von der Strahlung des schwarzen Körpers zu der Abstrahlung von der Außenseite des Abgasschachtes;
- ϵ_{iB} das Verhältnis der Strahlung des schwarzen Körpers, abgestrahlt von der inneren Oberfläche des Zuluftschachtes;
- D_{ha} der hydraulische Durchmesser der Außenwand der Abgasanlage, in m;
- D_{hiB} der hydraulische Durchmesser der Innenwand des Zuluftschachtes, in m;
- $Nseg$ die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage, die in der Berechnung berücksichtigt werden.

Die Wärmebilanz wird nach folgender Gleichung berechnet:

Wärmebilanz zwischen Abgas führendem Schacht, Zuluft und Umgebungsluft

$$q_{C,j} = q_{u,j} + q_{B,j} \quad \text{in W} \quad (118)$$

Wärmebilanz an der Außenwand der Abgasanlage

$$q_{C,j} = q_{a,j} + q_{Rad,j} \quad \text{in W} \quad (119)$$

Wärmebilanz an der Innenwand des Zuluftschachtes

$$q_{u,j} = q_{iB,j} + q_{Rad,j} \quad \text{in W} \quad (120)$$

Bei kurzen Abschnitten können für die mittleren Temperaturen die folgenden Beziehungen angewendet werden:

$$T_{m,j} = \frac{T_{e,j} + T_{o,j}}{2} \quad \text{in K} \quad (121)$$

$$T_{mB,j} = \frac{T_{eB,j} + T_{oB,j}}{2} \quad \text{in K} \quad (122)$$

7.8.3.3 Abkühlzahl

Für die Berechnung der Abkühlzahl siehe 7.8.2.4.

7.8.3.4 Wärmedurchgangskoeffizient

Für die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizient siehe 7.8.2.5.

7.8.4 Mittlere Temperaturen für die Druckberechnung

Die mittleren Abgastemperaturen T_m , gemittelt über die Länge der Abgasanlage, werden nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_m = \frac{Nseg}{\sum_{j=1}^{Nseg} \frac{1}{T_{m,j}}} \quad \text{in K} \quad (123)$$

Die mittleren Abgastemperaturen T_{mV} , gemittelt über der Länge des Verbindungsstückes, werden nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_{mV} = \frac{NsegV}{\sum_{j=1}^{NsegV} \frac{1}{T_{mV,j}}} \quad \text{in K} \quad (124)$$

Die mittleren Temperaturen der Zuluft T_{mB} , gemittelt über der Länge des Zuluftschachtes, werden nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_{mB} = \frac{Nseg}{\sum_{j=1}^{Nseg} \frac{1}{T_{mB,j}}} \quad \text{in K} \quad (125)$$

Die mittleren Temperaturen der Zuluft T_{mBV} , gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, werden nach folgender Gleichung berechnet:

$$T_{mBV} = \frac{N_{seg}V}{\sum_{j=1}^{N_{seg}V} \frac{1}{T_{mBV,j}}} \quad \text{in K} \quad (126)$$

Dabei ist

- T_m die mittlere Temperatur des Abgases, gemittelt über die Länge der Abgasanlage, in K;
- $T_{m,j}$ die mittlere Temperatur des Abgases, gemittelt über die Länge des Abschnittes j , in K;
- T_{mV} die mittlere Temperatur des Abgases, gemittelt über die Länge des Abgas-Verbindungsstückes, in K;
- $T_{mV,j}$ die mittlere Temperatur des Abgases, gemittelt über die Länge des Abschnittes j des Abgas-Verbindungsstückes, in K;
- T_{mB} die mittlere Temperatur der Zuluft, gemittelt über der Länge des Zuluftschachtes, in K;
- $T_{mB,j}$ die mittlere Temperatur der Zuluft, gemittelt über die Länge des Abschnittes j des Zuluftschachtes, in K;
- T_{mBV} die mittlere Temperatur der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in K;
- $T_{mBV,j}$ die mittlere Temperatur der Zuluft, gemittelt über die Länge des Abschnittes j des Verbindungsstückes, in K;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte der Abgasanlage;
- $N_{seg}V$ die Anzahl der Abschnitte des Verbindungsstückes.

7.9 Ermittlung der Dichte und der Geschwindigkeit

7.9.1 Dichte und Geschwindigkeit des Abgases

Die Dichte und die Geschwindigkeit des Abgases, gemittelt über die Länge der Abgasanlage ρ_m und w_m und des Abgas-Verbindungsstückes ρ_{mV} und w_{mV} , werden nach 5.9 berechnet.

7.9.2 Dichte und Geschwindigkeit der Zuluft

Die Dichte der Zuluft gemittelt, über die Länge des Verbindungsstückes ρ_{mBV} , wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\rho_{mBV} = \frac{p_L}{R_L \cdot T_{mB}} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (127)$$

Dabei ist

- ρ_{mBV} die Dichte der Zuluft gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in kg/m^3 ;
- p_L der Außenluftdruck, in Pa;
- R_L die Gaskonstante der Luft, in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
- T_{mBV} die mittlere Temperatur der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in K.

Die Geschwindigkeit der Zuluft w_{mBV} , gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$w_{mBV} = \frac{\dot{m}_B}{A_{BV} \cdot \rho_{mBV}} \quad \text{in m/s} \quad (128)$$

Dabei ist

- w_{mBV} die Geschwindigkeit der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m/s;
- \dot{m}_B der Massenstrom der Zuluft, in kg/s;
- A_{BV} die Querschnittsfläche des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m²;
- ρ_{mBV} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in kg/m³.

Die Dichte der Zuluft ρ_{mB} , gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\rho_{mB} = \frac{p_L}{R_L \cdot T_{mB}} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (129)$$

Dabei ist

- ρ_{mB} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in kg/m³;
- p_L der Außenluftdruck, in Pa;
- R_L die Gaskonstante der Luft, in J/(kg · K);
- T_{mB} die mittlere Temperatur der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in K.

Die Geschwindigkeit der Zuluft w_{mB} , gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$w_{mB} = \frac{\dot{m}_B}{A_B \cdot \rho_{mB}} \quad \text{in m/s} \quad (130)$$

Dabei ist

- w_{mB} die Geschwindigkeit der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in m/s;
- \dot{m}_B der Massenstrom der Zuluft, in kg/s;
- A_B die Querschnittsfläche des Zuluftschachtes, in m²;
- ρ_{mB} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in kg/m³.

7.10 Ermittlung der Drücke

7.10.1 Druck an der Abgaseinführung in den Abgas führenden Schacht der Abgasanlage

Für die Berechnung des Druckes an der Abgaseinführung in den Abgas führenden Teil der Abgasanlage siehe 5.10.1 und 7.2.

7.10.2 Ruhedruck in einem Abschnitt der Abgasanlage (P_H)

Für die Berechnung des Ruhedruckes (P_H) in einem Abschnitt der Abgasanlage (P_H) siehe 5.10.2.

7.10.3 Förderdruck in einem Abschnitt der Abgasanlage (P_R)

Für die Berechnung des Förderdruckes im Abschnitt der Abgasanlage (P_R) siehe 5.10.3.

7.10.4 Winddruck (P_L)

Bei der Konstruktion des Einlasses und des Auslasses wird davon ausgegangen, dass diese so ausgeführt sind, dass Windeinflüsse minimiert sind.

Daraus folgt:

$$P_L = 0.$$

7.11 Notwendiger Unterdruck an der Abgaseinführung in die Abgasanlage (P_{Ze}) und maximal nutzbarer Überdruck an der Abgaseinführung in den senkrechten Teil der Abgasanlage (P_{Zoe})**7.11.1 Allgemeines**

Für Allgemeines, siehe Text in 5.11.1.

7.11.2 Für die Berechnung notwendiger Förderdruck der Feuerstätte (P_W) und maximaler zur Verfügung stehender Förderdruck der Feuerstätte (P_{W0})

Für die Berechnung des minimalen Förderdruckes der Feuerstätte (P_W) siehe 5.11.2.

7.11.3 Notwendiger Förderdruck für das Verbindungsstück (P_{FV})

Für die Berechnung des notwendigen Förderdruckes für das Verbindungsstück (P_{FV}) siehe 5.11.3.

7.11.4 Förderdruck der Zuluft**7.11.4.1 Ruhedruck im Zuluftschacht (P_{HB})**

Der Ruhedruck im Zuluftschacht wird nach folgender Gleichung berechnet.:

$$P_{HB} = H_B \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_{mB}) \quad \text{in Pa} \quad (131)$$

Dabei ist

P_{HB} der Ruhedruck des Zuluftschachtes, in Pa;

H_B die Höhe des Zuluftschachtes, in m;

g die Erdbeschleunigung infolge Schwerkraft, angenommen zu 9,81, in m/s²;

ρ_L die Dichte der Umgebungsluft, in kg/m³;

ρ_{mB} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in kg/m³.

ANMERKUNG Erfahrungsgemäß sollte die kleinste Querschnittsfläche des Zuluftschachtes von konzentrischen Luft-Abgassystemen begrenzt werden. Hierfür wird ein Faktor von 1,5 mal der Querschnittsfläche des Abgasschachtes empfohlen.

7.11.4.2 Ruhedruck im Verbindungsstück für die Zuluft (P_{HBV})

Der Ruhedruck im Verbindungsstück für die Zuluft wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$P_{HBV} = H_{BV} \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_{mBV}) \quad \text{in Pa} \quad (132)$$

Dabei ist

- P_{HBV} der Ruhedruck im Verbindungsstück für die Zuluft, in Pa;
- H_{BV} der senkrechte Abschnitt des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m;
- g die Erdbeschleunigung infolge Schwerkraft angenommen zu 9,81, in m/s^2 ;
- ρ_L die Dichte der Umgebungsluft, in kg/m^3 ;
- ρ_{mBV} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in kg/m^3 .

7.11.4.3 Förderdruck im Zuluftschacht (P_{RB})

Der Förderdruck für die Zuluft P_{RB} wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$P_{RB} = S_{EB} \cdot \left(\psi_B \cdot \frac{L}{D_{hB}} + \sum \zeta_B \right) \cdot \frac{\rho_{mB}}{2} \cdot w_{mB}^2 + S_{EGB} \cdot P_{GB} \quad \text{in Pa} \quad (133)$$

Dabei ist

- P_{RB} der Förderdruck der Zuluft im Zuluftschacht der Abgasanlage, in Pa;
- P_{GB} die Druckänderung durch Geschwindigkeitsänderung des Zuluftmassenstromes im Zuluftschacht der Abgasanlage, in Pa;
- ψ_B Widerstandszahl infolge Reibung im Zuluftschacht der Abgasanlage;
- L die Länge der Abgasanlage, in m;
- D_{hB} der hydraulische Durchmesser des Zuluftschachtes der Abgasanlage, in m;
- $\sum \zeta_B$ die Summe der Widerstandszahlen im Zuluftschacht der Abgasanlage;
- ρ_{mB} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge der Abgasanlage, in kg/m^3 ;
- w_{mB} die Geschwindigkeit der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in m/s;
- S_{EB} die strömungstechnische Sicherheitszahl im Zuluftschacht;
- S_{EGB} die strömungstechnische Sicherheitszahl für den Förderdruck infolge Geschwindigkeitsänderung in der Abgasanlage ($S_{EGB} = S_{EB}$ für $P_{GB} \geq 0$ und $S_{EGB} = 1,0$ für $P_{GB} < 0$).

Die Widerstandszahlen ψ_B infolge Reibung im Zuluftschacht werden für verschiedene Rauigkeiten nach der folgenden Gleichung ermittelt:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi_B}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re_B \cdot \sqrt{\psi_B}} + \frac{r_B}{3,71 \cdot D_{hB}} \right) \quad (—) \quad (134)$$

Dabei ist

- D_{hB} der hydraulische Durchmesser des Zuluftschachtes, in m;
- r_B der mittlere Rauigkeitsbeiwert der Innenwand des Zuluftschachtes, in m;
- Re_B die Reynolds-Zahl des Zuluftschachtes (siehe 7.8.2.5.3);
- ψ_B die Widerstandszahl infolge Reibung des Zuluftschachtes.

Für Reynolds-Zahlen unter 2 300 kann der Reibungsbeiwert für die Reynolds-Zahl 2 300 angesetzt werden.

Die Werte für die mittleren Rauigkeiten müssen vom Hersteller angegeben werden. Liegen keine Herstellerangaben vor, sind typische mittlere Rauigkeitsbeiwerte für verschiedene Werkstoffe in Anhang B, Tabelle B.4, angegeben.

Die Druckänderung P_{GB} infolge Geschwindigkeitsänderung des Massenstromes wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$P_{GB} = \frac{\rho_{mB}}{2} \cdot w_{mB}^2 \quad \text{in Pa} \quad (135)$$

Dabei ist

- ρ_{mB} die Dichte der Zuluft gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in kg/m^3 ;
- P_{GB} die Druckänderung infolge Geschwindigkeitsänderung des Massenstromes im Zuluftschacht, in Pa;
- w_{mB} die Geschwindigkeit der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in m/s.

7.11.4.3 Förderdruck im Verbindungsstück des Zuluftschachtes (P_{RBV})

Der Förderdruck im Verbindungsstück des Zuluftschachtes P_{RBV} wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$P_{RBV} = S_{EB} \cdot \left(\psi_{BV} \cdot \frac{L_{BV}}{D_{hBV}} + \sum \zeta_{BV} \right) \cdot \frac{\rho_{mBV}}{2} \cdot w_{mBV}^2 + S_{EGBV} \cdot P_{GBV} \quad \text{in Pa} \quad (136)$$

Dabei ist

- P_{RBV} der Förderdruck im Verbindungsstück für die Zuluft, in Pa;
- P_{GBV} die Druckänderung infolge Geschwindigkeitsänderung des Massenstromes der Zuluft im Verbindungsstück für die Zuluft, in Pa;
- ψ_{BV} die Widerstandszahl infolge innerer Reibung im Verbindungsstück für die Zuluft;
- L_{BV} die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m;
- D_{hBV} der hydraulische Durchmesser der Zuluft im Verbindungsstück für die Zuluft, in m;
- $\sum \zeta_{BV}$ die Summe der Widerstandszahlen für den Massenstrom im Verbindungsstück für die Zuluft;
- ρ_{mBV} die Dichte der Zuluft, gemittelt, über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in kg/m^3 ;
- w_{mBV} die Geschwindigkeit der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m/s;
- S_{EB} die strömungstechnische Sicherheitszahl für das Verbindungsstück für die Zuluft;
- S_{EGBV} die strömungstechnische Sicherheitszahl für den Förderdruck infolge Geschwindigkeitsänderung des Massenstromes im Verbindungsstück für Zuluft ($S_{EGBV} = S_{EB}$ für $P_{GBV} \geq 0$ und $S_{EGBV} = 1,0$ für $P_{GBV} < 0$).

Die Widerstandszahl infolge Reibung ψ_{BV} des Abgasschachtes ist für verschiedene Rauigkeiten nach der folgenden Gleichung zu ermitteln:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi_{BV}}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re_{BV} \cdot \sqrt{\psi_{BV}}} + \frac{r_{BV}}{3,71 \cdot D_{hBV}} \right) \quad (—) \quad (137)$$

Dabei ist

- D_{hBV} der hydraulische Durchmesser des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m;
- r_{BV} der mittlere Rauigkeitsbeiwert der Innenwand des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m;
- Re_{BV} die Reynolds-Zahl im Verbindungsstück für die Zuluft (siehe 7.8.2.5.3);
- ψ_{BV} die Widerstandszahl infolge Reibung im Verbindungsstück für die Zuluft.

Für Reynolds-Zahlen unter 2 300 kann der Reibungsbeiwert für die Reynolds-Zahl 2 300 angesetzt werden.

Die Werte für die mittleren Rauigkeiten müssen von Herstellerseite angegeben werden. Liegen keine Herstellerangaben vor, sind typische mittlere Rauigkeitsbeiwerte für verschiedene Werkstoffe in Anhang B, Tabelle B.4, angegeben.

Die Druckänderung P_{GBV} infolge Geschwindigkeitsänderung des Massenstromes im Verbindungsstück für die Zuluft wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$P_{GBV} = \frac{\rho_{mBV}}{2} \cdot w_{mBV}^2 - \frac{\rho_{mB}}{2} \cdot w_{mB}^2 \quad \text{in Pa} \quad (138)$$

Dabei ist

- P_{GBV} die Druckänderung infolge Geschwindigkeitsänderung des Massenstromes im Verbindungsstück für die Zuluft, in Pa;
- ρ_{mBV} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in kg/m^3 ;
- ρ_{mB} die Dichte der Zuluft, gemittelt über die Länge des Zuluftschachtes, in kg/m^3 ;
- w_{mBV} die Geschwindigkeit der Zuluft, gemittelt über die Länge des Verbindungsstückes für die Zuluft, in m/s;
- w_{mB} die Geschwindigkeit der Zuluft, gemittelt über die Länge im Zuluftschachte, in m/s.

7.12 Ermittlung der Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage (T_{iob})

Die Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage T_{iob} bei Temperaturbeharrung wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$T_{iob} = T_{o,Nseg} - \frac{k_{,Nseg}}{\alpha_{1,Nseg}} \cdot (T_{o,Nseg} - T_{uo}) \quad \text{in K} \quad (139)$$

Dabei ist

- $T_{\text{io}b}$ die Innenwandtemperatur an der Mündung der Abgasanlage bei Temperaturbeharrung, in K;
- $T_{\text{o},N\text{seg}}$ die Abgastemperatur am Ende des letzten Abschnittes $N\text{seg}$ der Abgasanlage, in K;
- $k_{,N\text{seg}}$ der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen dem Abgasschacht und dem Übergang der Zuluft des letzten Abschnittes $N\text{seg}$ der Abgasanlage, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- $\alpha_{1,N\text{seg}}$ der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Abgas und der inneren Oberfläche des Abgasschachtes des letzten Abschnittes $N\text{seg}$ der Abgasanlage, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- T_{uo} die Umgebungslufttemperatur an der Mündung der Abgasanlage, in K.

8 Berücksichtigung der Kondensationswärme des Wasserdampfes im Abgas

8.1 Allgemeines

Der vorhergehende Abschnitt ermöglicht die Berechnung von Kenngrößen für Abgasanlagen, die unter Nassbedingungen betrieben werden, ohne Berücksichtigung der Wärme, die aus dem Kondensationsvorgang des Wasserdampfes im Abgas gewonnen wird. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die Kondensationswärme des Wasserdampfes (latente Wärme aus den Kondensationsvorgängen) berechnet werden kann, und wie die Auswirkung auf die Temperaturen in der Abgasanlage dadurch ist. Es wird empfohlen, nur danach zu rechnen, wenn die Temperaturbedingung nicht eingehalten werden kann (siehe 5.3).

Die Auswirkungen auf die Druckbedingung werden in diesem Abschnitt nicht behandelt.

ANMERKUNG Die Gaskonstante R , welche die Kondensation berücksichtigt, kann nach Anhang E bestimmt werden.

Die Kondensationswärme, die in der Berechnung berücksichtigt werden kann, ist sehr komplex, weil die Wärme- und Massenstromflüsse meist nur dreidimensional abgebildet werden können. Als Beispiel sei angeführt, dass Kondensat an der Innenwand des Abgasschachtes ablaufen und an einer Stelle mit höherer Temperatur wieder verdunsten kann. Das Berechnungsverfahren, das in diesem Dokument angegeben ist, berücksichtigt nur den Effekt der Kondensation des Wasserdampfes auf der Innenwand des Abgasschachtes, wenn die Innenwandtemperatur niedriger oder gleich des Wasserdampftaupunktes des Abgases ist, erlaubt jedoch den größten Betrag an Masse des Wasserdampfes mit einem Faktor $f_K < 100\%$ aufgrund von Erfahrungswerten zu reduzieren.

Bei der Berechnung mit Kondensationswärme wird die Abgasanlage in $N\text{seg}$ -Abschnitte gleicher Länge von höchstens 0,5 m eingeteilt. Das Verbindungsstück wird ebenfalls in $N\text{segV}$ -Abschnitte gleicher Länge von höchstens 0,5 m eingeteilt, wenn die Innenwandtemperatur am Auslass des Verbindungsstückes niedriger ist als die Wasserdampftaupunkttemperatur des Abgases.

8.2 Beginn der Kondensation

Um den Abschnitt $N\text{segK}$ und/oder $N\text{segKV}$ zu finden, wo die Kondensation beginnt, ist die Innenwandtemperatur $T_{\text{io}b,j}$ am Ende jedes Abschnittes j nach Abschnitt 5 oder Abschnitt 7 zu berechnen, beginnend mit dem ersten Abschnitt der Abgasanlage oder des Verbindungsstückes in dem Kondensation auftreten kann, bis die folgende Beziehung erfüllt ist:

$$T_{\text{io}b,j} - T_{\text{pe},1} < 0 \quad \text{in K} \quad (140)$$

mit

$$T_{\text{io}b,j} = T_{\text{ob},j} - \frac{k_{\text{b},j}}{\alpha_{1,j}} \cdot (T_{\text{ob},j} - T_{\text{u},j}) \quad \text{in K} \quad (141)$$

Dabei ist

- $T_{iob,j}$ die Innenwandtemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in K;
- $T_{pe,1}$ der Wasserdampftaupunkt am Abgaseintritt in den ersten Abschnitt, in K;
- $k_{b,j}$ der Wärmedurchgangskoeffizient im Abschnitt j bei Temperaturbeharrung (siehe Abschnitt 5 oder Abschnitt 7), in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\alpha_{i,j}$ der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion des Abschnittes j (siehe Abschnitt 5 oder Abschnitt 7), in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $T_{obj,j}$ die Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung (siehe Abschnitt 5 oder Abschnitt 7), in K;
- $T_{u,j}$ die Umgebungstemperatur im Bereich des Abschnittes j , in K.

ANMERKUNG 1 Es ist erforderlich zu überprüfen, ob die Bedingung nach Gleichung (140) erfüllt ist, insbesondere wenn im Abgasschacht Querschnittsänderungen erfolgen oder sich der Wert des Wärmedurchlasswiderstandes im Verbindungsstück und/oder im Abgasschacht ändert, besonders am Eintritt in die Abgasanlage (den Abgasschacht).

Der Wasserdampftaupunkt am Eintritt in den ersten Abschnitt des Verbindungsstückes $T_{peV,1}$ hängt vom Wasserdampfgehalt des Abgases am Abgasstutzen der Feuerstätte ab. Für übliche Feuerstätten (nicht Brennwertkessel) ist $T_{peV,1} = T_p$. Für Brennwertkessel sollte der Wert für den Wasserdampfgehalt des Abgases $\sigma(H_2O)_W$ vom Hersteller in Erfahrung gebracht werden. Mit diesem Wert können der Wasserdampfpartialdruck am Abgasstutzen des Wärmerzeugers p_{DW} und der Wasserdampftaupunkt $T_{peV,1}$ nach den Gleichungen (B.6) und (B.7) in Anhang B bestimmt werden.

ANMERKUNG 2 Liegen keine Herstellerangaben vor, kann die Rücklauftemperatur zum Kessel T_{bf} als Wasserdampftaupunkt $T_{peV,1} = T_{bf}$ genommen werden. Der entsprechende Wasserdampfpartialdruck p_{DW} kann nach Gleichung (B.7a) bestimmt werden.

Wenn der Abgasmassenstrom am Abgasstutzen einer Brennwertfeuerstätte \dot{m}_W die Kondensation in der Feuerstätte nicht berücksichtigt, kann der Abgasmassenstrom nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\dot{m}_W = \dot{m} - \Delta\dot{m}_{DW} \quad \text{in kg/s} \quad (142)$$

mit

$$\Delta\dot{m}_{DW} = \dot{m} \cdot \frac{R}{R_D} \cdot \left(1 - \frac{p_D}{p_L}\right) \cdot \left(\frac{p_D}{p_L - p_D} - \frac{p_{DW}}{p_L - p_{DW}}\right) \quad \text{in kg/s} \quad (143)$$

Dabei ist

- \dot{m}_W der Abgasmassenstrom am Abgasstutzen der Feuerstätte unter Berücksichtigung der Änderung des Massenstromes durch Kondensation in der Feuerstätte, in kg/s;
- $\Delta\dot{m}_{DW}$ der Kondensatmassenstrom der Feuerstätte, in kg/s;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom vor Kondensation, in kg/s;
- R die Gaskonstante des Abgases vor Kondensation, in $J/(kg \cdot K)$;
- R_D die Gaskonstante des Wasserdampfes; sie ist mit 496 anzusetzen, in $J/(kg \cdot K)$;
- p_L der Außenluftdruck, in Pa;
- p_D der Wasserdampfpartialdruck vor Kondensation, in Pa;
- p_{DW} der Wasserdampfpartialdruck am Abgasstutzen der Feuerstätte, in Pa.

Ist $N_{segKV} = 1$, gelten folgende Gleichungen:

$$\dot{m}_{oV,0} = \dot{m}_W \quad \text{in kg/s} \quad (144)$$

$$T_{obV,0} = T_W \quad \text{in K} \quad (145)$$

$$T_{iobV,0} = T_W - \frac{k_{bV,1}}{\alpha_{iV,1}} \cdot (T_W - T_{uV,1}) \quad \text{in K} \quad (146)$$

Dabei ist

- $\dot{m}_{oV,0}$ der Abgasmassenstrom am Einlass in den ersten Abschnitt, in kg/s;
- $T_{obV,0}$ die Abgastemperatur am Einlass in den ersten Abschnitt bei Temperaturbeharrung, in K;
- $T_{iobV,0}$ die Innenwandtemperatur im ersten Abschnitt bei Temperaturbeharrung, in K;
- T_W die Abgastemperatur am Abgasstutzen der Feuerstätte bei Temperaturbeharrung, in K;
- $k_{bV,1}$ der Wärmedurchgangskoeffizient im ersten Abschnitt bei Temperaturbeharrung, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $\alpha_{iV,1}$ der Wärmeübergangskoeffizient im ersten Abschnitt, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $T_{uV,1}$ die Umgebungstemperatur des ersten Abschnittes, in K.

Der Wasserdampftaupunkt $T_{pe,1}$ am Eintritt des Abgases in den ersten Abschnitt der Abgasanlage hängt vom Wasserdampfgehalt des Abgases am Auslass des Verbindungsstückes ab. Tritt im Verbindungsstück keine Kondensation auf, kann $T_{pe,1} = T_{pV,1}$ angesetzt werden. Andernfalls kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$\sigma(H_2O)_{V,NsegV} = \frac{\frac{R}{R_D} \cdot \frac{p_D}{p_L} - \frac{\Delta\dot{m}_{DW} + \Delta\dot{m}_{DV}}{\dot{m}}}{\frac{R}{R_D} - \frac{\Delta\dot{m}_{DW} + \Delta\dot{m}_{DV}}{\dot{m}}} \cdot 100 \quad \text{in kg/s} \quad (147)$$

mit

$$\Delta\dot{m}_{DV} = \sum_{j=NsegKV}^{NsegV} \Delta\dot{m}_{D,j} \quad \text{in kg/s} \quad (148)$$

Dabei ist

- $\sigma(H_2O)_{V,NsegV}$ der Wasserdampfgehalt des Abgases am Auslass des Verbindungsstückes, in %;
- R die Gaskonstante des Abgases vor der Kondensation, in $J/(kg \cdot K)$;
- R_D die Gaskonstante des Wasserdampfes; sie ist mit dem Wert 496 anzusetzen, in $J/(kg \cdot K)$;
- p_L der Außenluftdruck, in Pa;
- p_D der Wasserdampfpartialdruck vor Kondensation, in Pa;
- $\Delta\dot{m}_{DW}$ der Kondensatmassenstrom der Feuerstätte, in kg/s;
- $\Delta\dot{m}_{DV}$ der Kondensatmassenstrom im Abgas-Verbindungsstück, in kg/s;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom vor Kondensation, in kg/s;
- N_{segV} die Anzahl der Abschnitte des Abgas-Verbindungsstückes;
- N_{segKV} die Anzahl der Abschnitte des Abgas-Verbindungsstückes, wo die Kondensation beginnt.

Mit Kenntnis des Wertes des Wasserdampfgehaltes des Abgases am Auslass des Verbindungsstückes $\sigma(\text{H}_2\text{O})_{V,NsegV}$ können der entsprechende Wasserdampfpartialdruck $p_{DV,NsegV}$ und der Wasserdampftaupunkt $T_{pe,1}$ mittels der Gleichungen (B.6) und (B.7) in Anhang B bestimmt werden.

Ist $NsegK = 1$, gilt folgende Gleichung :

$$\dot{m}_{o,0} = \dot{m}_W - \Delta\dot{m}_{DV} \quad \text{in kg/s} \quad (149)$$

$$T_{ob,0} = T_{eb} \quad \text{in K} \quad (150)$$

$$T_{iob,0} = T_{eb} - \frac{k_{b,1}}{\alpha_{i,1}} \cdot (T_{eb} - T_{u,1}) \quad \text{in K} \quad (151)$$

Dabei ist

- $\dot{m}_{o,0}$ der Abgasmassenstrom am Einlass in den ersten Abschnitt, in kg/s;
- $\Delta\dot{m}_{DV}$ der Kondensatmassenstrom im Abgas-Verbindungsstück, in kg/s;
- $T_{ob,0}$ die Abgastemperatur am Einlass in den ersten Abschnitt bei Temperaturbeharrung, in K;
- $T_{iob,0}$ die Innenwandtemperatur am Einlass in den ersten Abschnitt bei Temperaturbeharrung, in K;
- T_{eb} die Abgastemperatur am Eintritt in die Abgasanlage bei Temperaturbeharrung, in K;
- $k_{b,1}$ der Wärmedurchgangskoeffizient im ersten Abschnitt bei Temperaturbeharrung, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- $\alpha_{i,1}$ der Wärmeübergangskoeffizient im ersten Abschnitt, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- $T_{u,1}$ die Umgebungslufttemperatur am ersten Abschnitt, in K.

8.3 Berechnung der Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes ($j \geq NsegK$) der Abgasanlage mit Kondensation

Die folgenden Gleichungen erlauben die Berechnung der Abgastemperatur $T_{ob,j}$ am Austritt des Abschnittes j der Abgasanlage nach einem iterativen Verfahren.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, die Iteration mit einem Wert ohne Berücksichtigung von Kondensation für $T_{ob,j}$ zu beginnen.

ANMERKUNG 2 Die Gleichungen für den Abschnitt einer Abgasanlage gelten auch für das Verbindungsstück, wenn die entsprechenden Werte verwendet werden.

Für die Berechnung der Innenwandtemperatur $T_{iob,j}$ am Auslass des Abschnittes j gilt folgende Gleichung:

$$T_{iob,j} = T_{ob,j} - \frac{k_{obtot,j}}{\alpha_{iotot,j}} \cdot (T_{ob,j} - T_{u,j}) \quad \text{in K} \quad (152)$$

Dabei ist

- $T_{iob,j}$ die Innenwandtemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in K;
- $T_{ob,j}$ die Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in K;
- $T_{u,j}$ die Umgebungstemperatur für den Bereich des Abschnittes j , in K;
- $k_{obtot,j}$ der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- $\alpha_{iotot,j}$ der gesamte Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und Kondensation am Auslass des Abschnittes j , in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Für den gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Kondensation im Abschnitt j , $\alpha_{\text{iotot},j}$ und den gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten, $k_{\text{obtot},j}$, gelten die folgenden Gleichungen:

$$\alpha_{\text{iotot},j} = \alpha_{\text{io},j} + \alpha_{\text{ioK},j} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (153)$$

$$k_{\text{obtot},j} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{iotot},j}} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{\text{ha}} \cdot \alpha_a}} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (154)$$

Dabei ist

$\alpha_{\text{iotot},j}$ der gesamte Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und Kondensation am Auslass des Abschnittes j , in $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

$\alpha_{\text{io},j}$ der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion im Abschnitt j (siehe Abschnitt 5 oder Abschnitt 7, berechnet für $T_{\text{ob},j}$), in $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

$\alpha_{\text{ioK},j}$ der Wärmeübergangskoeffizient für Kondensation am Auslass des Abschnittes j , in $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

$k_{\text{obtot},j}$ der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

$\left(\frac{1}{\Lambda}\right)$ der Wärmedurchlasswiderstand, in $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$;

D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;

D_{ha} der äußere hydraulische Durchmesser, in m;

α_a der äußere Wärmeübergangskoeffizient, in $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

Für den Wärmeübergangskoeffizienten durch Kondensation $\alpha_{\text{ioK},j}$ gilt folgende Gleichung:

$$\alpha_{\text{ioK},j} = \frac{q_{\text{K},j} \cdot N\text{seg}}{l_{\text{c},j} \cdot U \cdot L \cdot (T_{\text{ob},j} - T_{\text{iob},j})} \quad \text{in W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (155)$$

mit

$$l_{\text{c},j} = 1 \quad \text{für } j > N\text{segK} \text{ oder } N\text{segK} = 1 \text{ und } T_{\text{iob},0} \leq T_{\text{pe},1} \quad (—) \quad (156)$$

und

$$l_{\text{c},j} = \frac{T_{\text{pe},1} - T_{\text{iob},j}}{T_{\text{iob},j-1} - T_{\text{iob},j}} \quad \text{für } j = N\text{segK} \text{ und } N\text{segK} > 1 \text{ oder } N\text{segK} = 1 \text{ und } T_{\text{iob},0} > T_{\text{pe},1} \quad (—) \quad (157)$$

Dabei ist

- $\alpha_{iK,j}$ der Wärmeübergangskoeffizient für Kondensation vom Abgas zur Innenwand des Abschnittes j , in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $q_{K,j}$ die Kondensationswärmemenge des Abschnittes j , in W ;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte;
- $l_{c,j}$ das Verhältnis der Oberfläche für die Kondensation im Abschnitt j ;
- U der innere Umfang, in m ;
- L die Länge der Abgasanlage, in m ;
- $T_{pe,1}$ der Wasserdampftaupunkt am Einlass in den ersten Abschnitt, in K ;
- $T_{iob,N_{seg}K}$ die Innenwandtemperatur am Auslass des Abschnittes $N_{seg}K$ bei Temperaturbeharrung, in K .

Für die Kondensationswärmemenge $q_{K,j}$ gilt folgende Gleichung:

$$q_{K,j} = \Delta \dot{m}_{D,j} \cdot r_D \quad \text{in W} \quad (158)$$

Dabei ist

- $q_{K,j}$ die Kondensationswärmemenge im Abschnitt j , in W ;
- $\Delta \dot{m}_{D,j}$ der Kondensatmassenstrom des Abschnittes j , in kg/s ;
- r_D die Enthalpie des verdampften Wassers ist mit einem Wert 2 400 000, in J/kg .

Für den Kondensatmassenstrom gilt folgende Gleichung:

$$\Delta \dot{m}_{D,j} = \dot{m} \cdot \frac{R}{R_D} \cdot \left(1 - \frac{p_D}{p_L}\right) \cdot \left(\frac{p_{D0,j-1}}{p_L - p_{D0,j-1}} - \frac{p_{D0,j}}{p_L - p_{D0,j}}\right) \cdot \frac{f_K}{100} \quad \text{in kg/s} \quad (159)$$

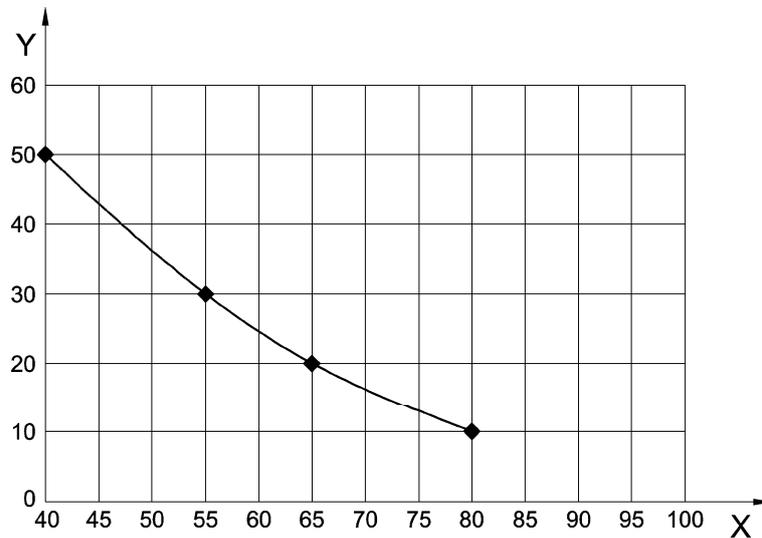
mit

$$p_{D0,j} = e^{\left(23,6448 - \frac{4077,9}{T_{iob,j} - 36,48}\right)} \quad \text{in Pa} \quad (160)$$

Dabei ist

- $\Delta \dot{m}_{D,j}$ der Kondensatmassenstrom des Abschnittes j in kg/s ;
- \dot{m} der Abgasmassenstrom vor der Kondensation, in kg/s ;
- R die Gaskonstante des Abgases vor der Kondensation, in $J/(kg \cdot K)$;
- R_D die Gaskonstante des Wasserdampfes ist 496, in $J/(kg \cdot K)$;
- p_D der Wasserdampfpartialdruck vor der Kondensation, in Pa ;
- $p_{D0,j}$ der Wasserdampfpartialdruck infolge Innenwandtemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in Pa ;
- p_L der Außenluftdruck, in Pa ;
- f_K der Faktor für die Kondensation des in Betracht kommenden Teiles der Abgasanlage;
- $T_{iob,j}$ die Innenwandtemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in K .

Für f_K siehe Gleichungen (161) und (162) und Bild 2. Für f_K ist die Abgastemperatur an der Abgaseinführung in die Abgasanlage T_e einzusetzen. Wenn im Verbindungsstück bereits Kondensation auftritt, muss für diesen Teil des Faktors f_{KV} die Abgastemperatur der Feuerstätte T_W eingesetzt werden.



X t_e oder t_w in °C

Y f_K oder f_{KV} in %

Bild 2 – Kondensationsfaktor f_K basierend auf der Abgastemperatur beim Eintritt des Abgases in die Abgasanlage t_e oder t_w

$$f_{KV} = 132,7 - 2,6 \cdot t_w + 0,0133 \cdot t_w^2 \quad \text{in \%} \quad (161)$$

und

$$f_K = 132,7 - 2,6 \cdot t_e + 0,0133 \cdot t_e^2 \quad \text{in \%} \quad (162)$$

Dabei ist

t_w die Abgastemperatur der Feuerstätte, in °C;

t_e die Abgastemperatur am Eintritt des Abgases in die Abgasanlage, in °C.

Die Gleichung gilt für $40 \text{ °C} \leq t_w \leq 80 \text{ °C}$ und $40 \text{ °C} \leq t_e \leq 80 \text{ °C}$. Für $t_w < 40 \text{ °C}$ ist $f_{KV} = 50 \text{ \%}$ und für $t_e < 40 \text{ °C}$ ist $f_K = 50 \text{ \%}$.

Für den Abgasmassenstrom am Auslass des Abschnittes $\dot{m}_{o,j}$ ist folgende Gleichung anzuwenden:

$$\dot{m}_{o,j} = \dot{m}_{o,j-1} - \Delta \dot{m}_{D,j} \quad \text{in kg/s} \quad (163)$$

Dabei ist

$\dot{m}_{o,j-1}$ der Abgasmassenstrom am Auslass des Abschnittes j , in kg/s;

$\Delta \dot{m}_{D,j}$ der Kondensatmassenstrom im Abschnitt j in kg/s.

Für die neu berechnete Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes $T_{ob,j}$ gilt folgende Gleichung:

$$T_{ob,j} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{o,j-1} \cdot c_{po,j-1}}{\dot{m}_{o,j} \cdot c_{po,j}} - \frac{K_{b,j}}{2} \right) \cdot T_{ob,j-1} + \frac{q_{K,j}}{\dot{m}_{o,j} \cdot c_{po,j}} + K_{b,j} \cdot T_{u,j}}{1 + \frac{K_{b,j}}{2}} \quad \text{in K} \quad (164)$$

mit

$$K_{b,j} = \frac{U \cdot k_{btot,j} \cdot L}{\dot{m}_{o,j} \cdot c_{po,j} \cdot Nseg} \quad (165)$$

mit

$$k_{btot,j} = (1 - l_{c,j}) \cdot k_{b,j-1} + l_{c,j} \cdot k_{btot,j} \quad \text{für } j = NsegK \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (166)$$

und

$$k_{btot,j} = \frac{k_{btot,j-1} + k_{btot,j}}{2} \quad \text{für } j > NsegK \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad (167)$$

Dabei ist

- $T_{ob,j}$ die neu berechnete Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes j , in K;
- $\dot{m}_{o,j}$ der Abgasmassenstrom am Auslass des Abschnittes j , in kg/s;
- $c_{po,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases am Auslass des Abschnittes j , in J/(kg · K);
- $K_{b,j}$ die Abkühlzahl des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung;
- $T_{ob,j-1}$ die Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes $j-1$ bei Temperaturbeharrung, in K;
- $q_{K,j}$ die Kondensationswärme des Abschnittes j , in W;
- $T_{u,j}$ die Umgebungstemperatur für den Bereich des Abschnittes j , in K;
- U der innere Umfang, in m;
- $k_{btot,j}$ der Wärmedurchgangskoeffizient des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- L die Länge, in m;
- $Nseg$ die Anzahl der Abschnitte;
- $l_{c,j}$ das Verhältnis der Kondensationsoberfläche im Abschnitt j ;
- $k_{b,j-1}$ der Wärmedurchgangskoeffizient des Abschnittes $j-1$ bei Temperaturbeharrung, in $W/(m^2 \cdot K)$;
- $k_{obtot,j}$ der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in $W/(m^2 \cdot K)$.

Für die Genauigkeit der Iteration ist folgende Gleichung anzuwenden:

$$|q_{A,j} - q_{C,j}| \leq \varepsilon_f \cdot q_{A,j} \quad \text{in W} \quad (168)$$

mit

$$q_{A,j} = \dot{m}_{o,j-1} \cdot c_{po,j-1} \cdot T_{ob,j-1} - \dot{m}_{o,j} \cdot c_{po,j} \cdot T_{ob,j} + q_{K,j} \quad \text{in W} \quad (169)$$

$$q_{C,j} = \frac{\alpha_{\text{itot},j} \cdot U \cdot L}{N_{\text{seg}}} \cdot \frac{T_{ob,j-1} - T_{iob,j-1} + T_{ob,j} - T_{iob,j}}{2} \quad \text{in W} \quad (170)$$

Dabei ist

- $q_{A,j}$ Die Wärmestromdifferenz zwischen dem Abgas an der Stelle des Zutritts und dem Auslass im Abschnitt j , in W;
- $q_{C,j}$ der gesamte Wärmestrom vom Abgas zur Innenwand im j , in K;
- ε_f der größtmögliche Konvergenzfehler, der mit einem Wert von 0,02 angenommen werden soll;
- $\dot{m}_{o,j}$ der Abgasmassenstrom am Auslass des Abschnittes j , in kg/s;
- $c_{po,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Abgases am Auslass des Abschnittes j , in J/(kg · K);
- $T_{ob,j}$ die Abgastemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung in K;
- $q_{K,j}$ die Kondensationswärmemenge des Abschnittes j , in W;
- $\alpha_{\text{itot},j}$ der gesamte Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und Kondensation am Auslass des Abschnittes j , in W/(m² · K);
- U der innere Umfang, in m;
- L die Länge der Abgasanlage, in m;
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte;
- $T_{iob,j}$ die Innenwandtemperatur am Auslass des Abschnittes j bei Temperaturbeharrung, in K.

Für Luft-Abgasanlagen mit konzentrischen Schächten können die Gleichungen (140) bis (170) mit folgenden Änderungen angewendet werden:

- anstelle von $T_{u,j}$ wird $T_{\text{mbB},j}$ eingesetzt;
- anstelle von $T_{uv,j}$ wird $T_{\text{mbBV},j}$ eingesetzt;
- anstelle von α_a wird $\alpha_{a,j}$ eingesetzt.

$T_{\text{mb},j}$, $T_{\text{mbBV},j}$ und $\alpha_{a,j}$ können mit der entsprechend geeigneten Gleichung von Abschnitt 7 berechnet werden.

Anhang A (informativ)

Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes

Der Wärmedurchlasswiderstand einer Abgasanlage $\left(\frac{1}{A}\right)_n$ kann aufgrund der Kenntnis der Wärmeleitkoeffizienten der Werkstoffe der Konstruktion wie folgt bestimmt werden:

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

Dabei ist

D_h der innere hydraulische Durchmesser, in m;

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

y Formbeiwert

= 1,0 für runde und ovale Querschnitte

= 1,10 für quadratische und rechteckige Querschnitte bis zu einem Seitenverhältnis von 1:1,5;

λ_n der Wärmeleitkoeffizient der Werkstoffe der einzelnen Schichten bei Betriebstemperatur (siehe Tabelle B.5), in W/(m·K).

Der Einfluss von Wärmebrücken für Metall-Abgasanlagen sollte mit einem Faktor berücksichtigt werden, der in EN 1859 aufgeführt ist.

Anhang B (informativ)

Tabellen

Tabelle B.1 — Ausgangswerte für die Ermittlung des Abgasmassenstromes \dot{m} , der spezifischen Gaskonstante von Abgas R , der spezifischen Wärmekapazität c_p , des Wasserdampftaupunktes t_p , der Taupunkterhöhung ΔT_{sp} , der Wärmeleitfähigkeit λ_A und der dynamischen Viskosität η_A von Abgas (c_p , λ_A und η_A bis 400 °C)

Brennstoffart	Charakteristische Brennstoffdaten						Koeffizienten (Ausgangswerte) für die Berechnung der Abgasdaten												
	H_u	$V_{Atr\ min}$	$V_{L\ min}$	V_{H_2O}	$\sigma(CO_2)_{max}$	$\sigma(SO_2)_{max}$	f_{m1}	f_{m2}	f_R ohne Kond.	f_R mit Kond.	f_{R1}	f_{R2}	f_{c0}	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_w	f_{s1}	f_{s2}
	kWh/kg kWh/m ³	m ³ /kg oder m ³ /m ³	m ³ /kg oder m ³ /m ³	m ³ /m ³	%	%	g·%/(kWs)	g/(kW·s)	1/%	1/%	1/%	1/%	J/(kgK·%)	J/(kgK ² ·%)	J/(kgK ³ ·%)	1/%	%	K	K
Koks	8,06	7,64	7,66	0,13	20,60	0,09	7,06	0,033	-0,003 6	-0,003 8	0,0036	- 0,0040	3,4	0,014	-0,000 014	0,004 6	1.235	99	7
Steinkohle(Anthrazit)	9,24	8,37	8,55	0,44	19,05	0,10	6,23	0,036	-0,002 8	-0,003 3	0,003 6	- 0,0039	5,6	0,014	-0,000 013	0,005 7	370	93	7
Braunkohle	5,42	5,09	5,17	0,68	19,48	0,04	6,61	0,055	-0,001 4	-0,002 6	0,003 7	- 0,004 0	10,3	0,015	-0,000 012	0,008 3	149	80	7
Schweröl < 4 % S	9,43	9,91	10,48	1,15	16,17	0,28	6,14	0,052	-0,001 2	-0,002 4	0,003 7	- 0,003 9	10,7	0,014	-0,000 012	0,008 2	142	94	7
Schweröl < 2 % S	9,61	10,06	10,67	1,21	16,15	0,14	6,11	0,052	-0,00 1	-0,002 3	0,003 7	- 0,003 8	11,0	0,014	-0,000 011	0,008 3	137	89	7
Schweröl < 1 % S	9,74	10,17	10,79	1,25	16,09	0,07	6,07	0,052	-0,000 9	-0,002 2	0,003 7	- 0,003 8	11,2	0,014	-0,000 011	0,008 4	134	85	7
Heizöl EL	11,86	10,52	11,26	1,49	15,40	0,00	4,94	0,046	-0,000 2	-0,001 8	0,003 8	- 0,003 7	13,0	0,014	-0,000 011	0,009 3	111	0	0
Kerosin	12,09	11,36	12,14	1,57	15,00	0,00	5,09	0,047	-0,000 2	-0,001 8	0,003 8	- 0,003 6	13,0	0,014	-0,000 011	0,009 3	111	0	0
Erdgas H	10,03	8,67	9,57	1,86	12,00	0,00	3,75	0,053	0,003 2	0,000 2	0,003 9	- 0,003 2	23,0	0,015	-0,000 007	0,014 2	57	0	0
Erdgas L	9,03	7,87	8,63	1,70	11,80	0,00	3,72	0,054	0,003 3	0,000 3	0,003 9	- 0,003 2	23,5	0,015	-0,000 007	0,014 4	56	0	0
Flüssiggas	26,67	22,46	24,51	4,10	13,80	0,00	4,20	0,049	0,001 3	-0,000 9	0,003 8	- 0,003 5	17,6	0,015	-0,000 009	0,011 6	77	0	0
Holz (23,1% Feuchte)	3,70	3,44	3,45	0,80	20,50	0,00	6,89	0,076	0,000 1	-0,001 8	0,003 8	- 0,004 1	15,4	0,016	-0,000 011	0,011 1	90	15	0
Holz (33,3% Feuchte)	3,12	2,98	2,99	0,86	20,50	0,00	7,08	0,090	0,00 1	-0,001 3	0,003 8	- 0,004 2	18,5	0,016	-0,000 010	0,012 8	72	15	0
Holz, Pellets	5,27	4,78	4,81	0,78	20,31	0,00	6,66	0,060	-0,00 1	-0,002 4	0,003 7	- 0,004 1	11,6	0,015	-0,000 012	0,009 1	127	15	0

Tabelle B.1 (fortgesetzt)

Legende

f_{m1}	Koeffizient zur Berechnung des Abgasmassenstromes, in g·%/(kW·s);
f_{m2}	Koeffizient zur Berechnung des Abgasmassenstromes, in g/(kW·s);
f_R	Koeffizient zur Berechnung der Gaskonstanten des Abgases, in 1/%;
f_{R1}	Koeffizient zur Berechnung der Gaskonstanten des Abgases, wobei der Wasserdampfgehalt des Abgases bekannt ist, in 1/%;
f_{R2}	Koeffizient zur Berechnung der Gaskonstanten des Abgases, wobei der Wasserdampfgehalt des Abgases bekannt ist, in 1/%;
f_{c0}	Koeffizient zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases, in J/(kg·K·%);
f_{c1}	Koeffizient zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases, in J/(kg·K ² ·%);
f_{c2}	Koeffizient zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases, in J/(kg·K ³ ·%);
f_{c3}	Koeffizient zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases, in 1/%;
f_w	Koeffizient zur Berechnung des Wassergehaltes des Abgases, in %;
f_{s1}	Koeffizient zur Berechnung der Taupunkterhöhung des Abgases, in K;
f_{s2}	Koeffizient zur Berechnung der Taupunkterhöhung des Abgases, in K;
H_u	Energieinhalt des Brennstoffes, in kWh/kg oder kWh/m ³ ;
$V_{Atr\ min}$	Verhältnis des minimalen trockenen Abgasvolumens zur Brennstoffmasse oder zum Brennstoffvolumen bei Normalbedingungen (273,15 K, 101 325 Pa), in m ³ /kg oder m ³ /m ³ ;
$V_{L\ min}$	Verhältnis des Mindest-Verbrennungsluftvolumens zur Brennstoffmasse oder zum Brennstoffvolumen bei Normalbedingungen (273,15 K, 101 325 Pa), in m ³ /kg oder m ³ /m ³ ;
V_{H_2O}	Verhältnis des Wasserdampfolumens zur Brennstoffmasse oder zum Brennstoffvolumen bei Normalbedingungen (273,15 K, 101 325 Pa), in m ³ /kg oder m ³ /m ³ ;
$\sigma(CO_2)_{max}$	höchste Volumenkonzentration an CO ₂ des trockenen Abgases, in %;
$\sigma(SO_2)_{max}$	höchste Volumenkonzentration an SO ₂ des trockenen Abgases, in %.

Tabelle B.1 (fortgesetzt)

Näherungsgleichungen:			Dabei ist
$\dot{m} = \left(\frac{f_{m1}}{\sigma(CO_2)} + f_{m2} \right) \cdot Q_F$	in g/s	(B.1)	\dot{m} der Abgasmassenstrom, in g/s;
$Q_F = \frac{100}{\eta_W} \cdot Q$	in kW	(B.2)	$\sigma(CO_2)$ die Volumenkonzentration CO ₂ des Abgases, in %;
$R = R_L \cdot [1 + f_R \cdot \sigma(CO_2)]$	in J/(kg·K)	(B.3)	Q_F die Feuerungs-Wärmeleistung, in kW;
$c_p = \frac{1011 + 0,05 \cdot t_m + 0,0003 \cdot t_m^2 + (f_{c0} + f_{c1} \cdot t_m + f_{c2} \cdot t_m^2) \cdot \sigma(CO_2)}{1 + f_{c3} \cdot \sigma(CO_2)}$	in J/(kg·K)	(B.4)	Q die Wärmeleistung der Feuerstätte, in kW;
$\sigma(H_2O) = \frac{100}{1 + \frac{f_w}{\sigma(CO_2)}} + 1,1$	in %	(B.5)	η_W der Wirkungsgrad der Feuerstätte, in %;
$p_D = \frac{\sigma(H_2O)}{100} \cdot p_L$	in Pa	(B.6)	R die Gaskonstante des Abgases, in J/(kg·K);
$t_p = \frac{4077,9}{23,6448 - \ln(p_D)} - 236,67$	in °C	(B.7)	R_L die Gaskonstante der Luft = 288 J/(kg·K);
$\Delta T_{sp} = f_{s1} + f_{s2} \cdot \ln(K_f)$	in K	(B.8)	c_p die spezifische Wärmekapazität des Abgases, in J/(kg·K);
$\lambda_A = 0,0223 + 0,000065 \cdot t_m$	in W/(m·K)	(B.9)	t_m die mittlere Abgastemperatur, in °C;
			$\sigma(H_2O)$ die Volumenkonzentration an H ₂ O im Abgas, in %;
			p_D der Wasserdampf-Partialdruck, in Pa;
			p_L der Außenluftdruck, in Pa;
			t_p die Taupunkttemperatur, in °C;

Tabelle B.1 (fortgesetzt)

$\eta_A = 15 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-9} \cdot t_m - 20 \cdot 10^{-12} \cdot t_m^2$	in N·s/m ² (B.10)	ΔT_{sp} die Taupunkterhöhung, in K;
$R = R_L \cdot \left\{ 0,996 + f_{R1} \cdot \sigma(H_2O) + f_{R2} \cdot \left[1 - \frac{\sigma(H_2O)}{100} \right] \cdot \sigma(CO_2) \right\}$	in J/(kg·K) (B.11)	K_f der Konversionsfaktor von SO ₂ in SO ₃ , in %;
$\sigma(H_2O) = \frac{p_D}{p_L} \cdot 100$	in % (B.12)	λ_A die Wärmeleitfähigkeit des Abgases, in W/(m·K);
$p_D = e^{\left(23,6448 - \frac{4077,9}{T_p - 36,48} \right)}$	in Pa (B.13)	η_A die dynamische Viskosität des Abgases, in N·s/m ² .
ANMERKUNG "f _R ohne Kondensation" sollte nur für Abgasanlagen mit trockener Betriebsweise eingesetzt werden. "f _R mit Kondensation" sollte für Abgasanlagen mit feuchter Betriebsweise eingesetzt werden.		

Tabelle B.2 — Anhaltswerte für die Feuerstätte

Brennstoff	Gleichungen für $P_{W,nw}$ und $\sigma(\text{CO}_2)$					
Koks, Steinkohle, Braunkohle Briketts	P_W	=	{	$15 \cdot \lg Q_N$	in Pa für	$Q_N \leq 100 \text{ kW}$
			$-70 + 50 \cdot \lg Q_N$	in Pa für	$100 \text{ kW} < Q_N \leq 1\,000 \text{ kW}$	
			80 Pa	für	$Q_N > 1\,000 \text{ kW}$	
	η_W	=	$68,65 + 4,35 \cdot \lg Q_N$	in % für	$Q_N \leq 2\,000 \text{ kW}$	
Holz (23,1 %Feuchte)	P_W	=	{	$15 \cdot \lg Q_N$	in Pa für	$Q_N \leq 50 \text{ kW}$
			$27 + 13 \cdot \lg Q_N$	in Pa für	$10 \text{ kW} < Q_N \leq 350 \text{ kW}$	
	η_W	=	$51,6 + 8,4 \cdot \lg Q_N$	in % für	$Q_N \leq 1\,000 \text{ kW}$	
	$\sigma(\text{CO}_2)$	=	{	8,0 %	für	$Q_N \leq 10 \text{ kW}$
			$6,0 + 2,0 \cdot \lg Q_N$	in % für	$10 \text{ kW} < Q_N \leq 1\,000 \text{ kW}$	
Öl und Gas (mit und ohne Gebläsebrenner)	P_W	=	{	$15 \cdot \lg Q_N$	in Pa für	$Q_N \leq 100 \text{ kW}$
			$-47 + 38,5 \cdot \lg Q_N$	in Pa für	$Q_N > 100 \text{ kW}$	
	η_W	=	{	$85,0 + 1,0 \cdot \lg Q_N$	in % für	$Q_N \leq 1\,000 \text{ kW}$
				88,0 %	für	$Q_N > 1\,000 \text{ kW}$
	$\sigma(\text{CO}_2)$	=	{	$\frac{f_{x1}}{1 - f_{x2} \cdot \lg Q_N}$	in % für	$Q_N \leq 100 \text{ kW}$
				f_{x3}	in % für	$Q_N > 100 \text{ kW}$

Tabelle B.3 — Werte für die Ermittlung von $\sigma(\text{CO}_2)$ bei Öl- und Gasbrennern

Brennstoff	Gebläsebrenner			Atmosphärischer Brenner ^a		
	f_{x1}	f_{x2}	f_{x3}	f_{x1}	f_{x2}	f_{x3}
Öl	11,2	0,076	13,2	-	-	-
Erdgas H	8,6	0,078	10,2	5,1	0,075	6,0
Flüssiggas	10,0	0,080	11,9	5,9	0,079	7,0

^a Werte nach der Nebenluftvorrichtung.

Tabelle B.4 — Typische Werte für die mittlere Rauigkeit r einiger Baustoffe/Bauteile

Werkstoffe des Innenrohres der Abgasanlage	Typische Werte für die mittlere Rauigkeit r m
Geschweißte Stahlrohre	0,001
Glas	0,001
Kunststoff	0,001
Aluminium	0,001
Keramikkinnenrohre	0,001 5
Schamotteformsteine	0,005
Blechkanäle gefalzt	0,002
Betonformstücke	0,003
Gemauerte Kanäle	0,005
Gewelltes Metall	0,005

Tabelle B.5 — Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c einiger Baustoffe von Abgasanlagen

Baustoff	ρ kg/m ³	c kJ/(kg·K)	t °C	λ W/(m·K)
Aluminium	2 800	0,88		160
Stahl	7 800	0,45	10	50
nichtrostende Stähle	7 900	0,46	10	17
Mauerwerk				
hochfeste Ziegel und Klinker (siehe prEN 1745:2000, Tabelle A.1)	1 800	1,00	10	0,55
	2 000			0,64
	2 200			0,74
Vollziegel, Hochlochziegel (siehe prEN 1745:2000, Tabelle A.1)	1 200		10	0,33
	1 400			0,40
	1 600			0,47
	1 800			0,55
Kalksandsteine (siehe prEN 1745:2000, Tabelle A.2)	1 000		10	0,30
	1 200			0,36
	1 400			0,46
	1 600			0,61
	1 800			0,81
Leichtbetonvollsteine mit leichtgewichtigen Zuschlagstoffen (siehe	800		10	0,33
	1 000			0,41
	1 200			0,52
	1 400			0,66
	1 600			0,83
	1 800			1,08

Tabelle B.5 (fortgesetzt)

Baustoff	ρ kg/m ³	c kJ/(kg·K)	t °C	λ W/(m·K)
Leichtbetonvollsteine mit Keramikzuschlagstoffen (siehe prEN 1745:2000, Tabelle A.9)	800		10	0,25
	1000			0,32
	1200			0,41
	1400			0,51
	1600			0,63
Vollbetonsteine	2 400	1,00	10	1,72
Putz, Kalkmörtel, Kalkzementmörtel	1 800	1,00	10	0,93
Keramik-Innenrohre/-Formblöcke		1,00	20	1,000
	2 000	0,92	200	1,100
Mineralfaserstoffe			20	0,035
	100	0,75	100	0,045
			200	0,065
Glas	2 200	0,80	20	1,070
			100	1,200
			200	1,370
PVDF (Polyvinylidenfluorid)	1 800	0,96	20 bis 150	0,190
PP (Polypropylen)	900	1,70	-	0,220

Tabelle B.6 — Wärmedurchlasswiderstand von abgeschlossenen Luftschichten, abhängig von der Schichtdicke d_n und der Oberflächentemperatur der wärmeabgebenden Wand (konzentrischer Ringspalt, vertikal angeordnet)

Oberflächentemperatur °C	Wärmedurchlasswiderstand $(1/\Lambda)_n$ in m ² ·K/W				
	Luftschichtdicke d_n (in m)				
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
40	0,123	0,147	0,153	0,152	0,150
100	0,087	0,101	0,101	0,100	0,099
150	0,065	0,075	0,075	0,074	0,074
200	0,050	0,055	0,055	0,055	0,054

ANMERKUNG Die effektive Wärmeleitfähigkeit von abgeschlossenen Luftschichten λ_n kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

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

Dabei ist

y der Formbeiwert (siehe Anhang A);

$D_{h,n}$ der äußere hydraulische Durchmesser der Innenwand im Anschluss an die Luftschicht, in Meter;

$\left(\frac{1}{\Lambda} \right)_n$ der Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht, in Quadratmeter Kelvin durch Watt;

d_n die Schichtdicke der Luftschicht, in Meter.

Tabelle B.7— Kennwerte für Nebenluftvorrichtungen

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

ANMERKUNG Die Kennwerte a_1 und a_2 für Nebenluftvorrichtungen sind in sechs Gruppen eingeteilt. Um festzustellen welche Gruppe zutrifft, ist die Kenntnis einer Leistungskurve der Nebenluftvorrichtung erforderlich. Diese erhält man indem der Volumenstrom durch die Nebenluftvorrichtung für drei Drücke, 5 Pa, 10 Pa und 40 Pa, die über dem Referenzeingangsdruck a_0 liegen, bestimmt wird (entsprechend der Berechnung nach den Gleichungen (56) und (57)).

Die Nebenluftvorrichtung wird der Gruppe zugeordnet, deren Leistungskurve mit allen Werten (alle drei gemessenen Werte des Nebenluftvolumenstromes) über einer definierten Kurve nach Anhang D liegt.

Tabelle B.8 — Einzelwiderstandszahlen für einige Formen

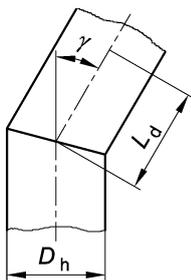
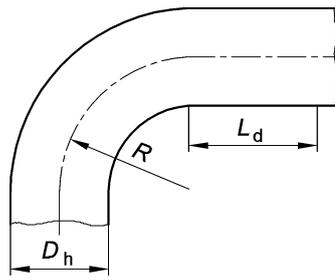
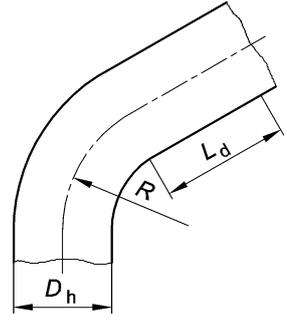
Nr	Form	Geometrische Abmessungen	ζ -Werte	
			$L_d/D_h \geq 30$	$30 > L_d/D_h \geq 2$
1		Winkel γ in °		
		10	0,1	0,1
		30	0,2	0,3
		45	0,3	0,4
		60	0,5	0,7
90	1,2	1,6		
2			90°-Bogen	
		0,5	1,0	1,2
		0,75	0,4	0,5
		1,0	0,25	0,3
		1,5	0,2	0,2
2,0	0,2	0,2		
3			60°-Bogen	
		$R = D_h$	$L_d/D_h \geq 30$	$30 > L_d/D_h \geq 2$
		0,5	0,6	1,0
		0,75	0,3	0,4
		1,0	0,2	0,3
1,5	0,2	0,2		
2,0	0,1	0,1		

Tabelle B.8 (fortgesetzt)

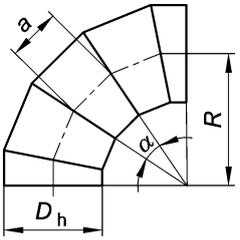
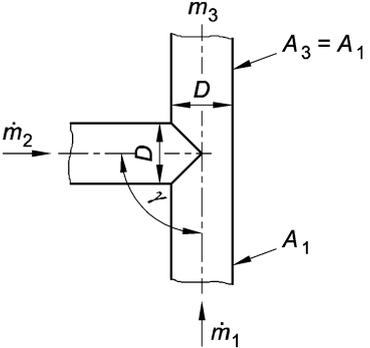
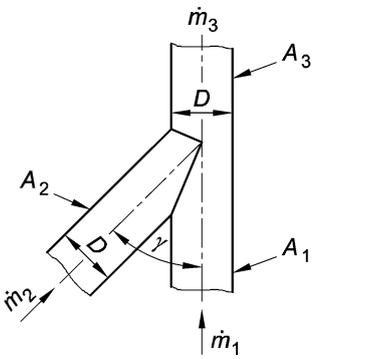
Nr	Form	Geometrische Abmessungen	ζ-Werte		
4		$a = 2 \cdot R \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ $a: D_h$ 1,0 1,5 2,0 3,0 5,0	90°-Bogen Anzahl der Segmente		
			2 × 45°	3 × 30°	4 × 22,5°
			0,4	0,25	0,17
			0,3	0,18	0,13
			0,3	0,17	0,12
			0,35	0,19	0,13
			0,4	0,20	0,15
Interpolationen zwischen den angegebenen Parametern sind zulässig.					
5		Winkel $\gamma = 90^\circ$ $A_3/A_2 = 1,0$ $\dot{m}_2 : \dot{m}_3$ 0,0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	ζ_{2-3}	ζ_{1-3}	
	 <p style="text-align: center;">Bezug: W_3</p>	Winkel $\gamma = 45^\circ$ $A_3/A_2 = 1,6$ $\dot{m}_2 : \dot{m}_3$ 0,0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	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	
			-0,92	0,03	
			-0,42	0,16	
			0,04	0,17	
			0,22	0,06	
			0,35	-0,18	
			0,35	-0,53	

Tabelle B.8 (fortgesetzt)

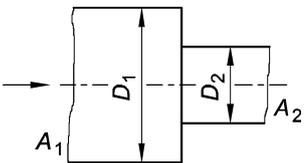
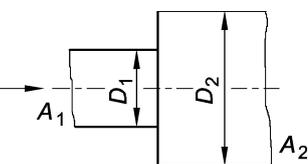
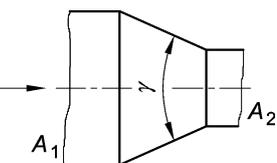
Nr	Form	Geometrische Abmessungen	ζ-Werte		
Gleichungen zur Berechnung der Einzelwiderstandszahlen bei Zusammenführungen ^a :					
$\zeta_{2-3} = -0,92 \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 - \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 \left[1,2 \left(\frac{A_3}{A_2} \cos \gamma - 1\right) + 0,8 \left(1 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^2\right) - \left(1 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{A_3}{A_2} \cos \gamma \right]$ $+ \left(2 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)$ $\zeta_{1-3} = 0,03 \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 - \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^2 \left[1 + 1,62 \left(\frac{A_3}{A_2} \cos \gamma - 1\right) - 0,38 \left(1 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right) \right]$ $+ \left(2 - \left(\frac{A_3}{A_2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)$ <p>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 Nr 6 bzw. Nr 8) und einer Zusammenführung $\frac{A_3}{A_2} = 1$ bestimmt werden.</p>					
^a nach Gardel.					
Interpolationen zwischen den angegebenen Parametern sind zulässig.					
6	 <p>Bezug: W₂</p>	$A_2 : A_1$ 0,4 0,6 0,8	0,33 0,25 0,15 Bei abgerundeter Einlaufkante ζ = 0		
7	 <p>Bezug: W₁</p>	$A_1 : A_2$ 0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	1,0 0,7 0,4 0,2 0,1 0		
8	<p>Übergänge</p>  <p>Bezug: W₂</p>	$A_1 : A_2$ 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

Tabelle B.8 (fortgesetzt)

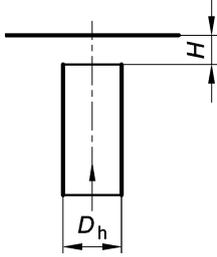
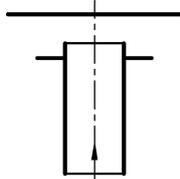
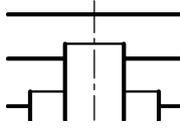
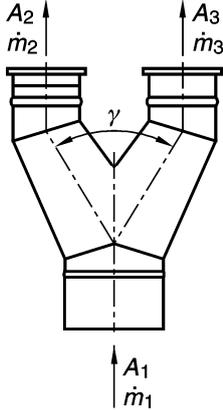
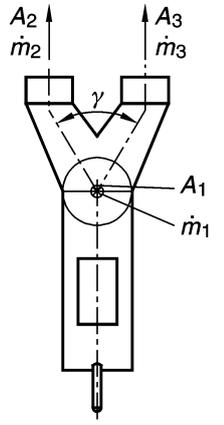
Nr	Form	Geometrische Abmessungen	ζ-Werte
9	<p>Regenhauben</p> 	H/D_h 0,5 1,0	1,5 1,0
10	<p>Aufsätze</p> <p>Ausätze ($P_L=0$) nach prEN 1856-1</p> 		1,6
11	 <p>aerodynamisch günstig wirkende Aufsätze für Überdruck-Abgasanlagen und raumluftunabhängige Feuerstätten ($P_L = 0$) nach prEN 1856-1.</p>		5,2 ($\zeta_{\text{Eintritt}} = 3,2$) ($\zeta_{\text{Austritt}} = 2,0$)
12	<p>Hosenstücke</p>  <p>Bezug: w_2 oder w_3</p>	$\gamma \approx 60^\circ$ $\frac{A_3}{A_2} = 1$ $\frac{A_3}{A_1} = 0,5$ $\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} = 1$ $\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 0,5$	0,5

Tabelle B.8 (fortgesetzt)

Nr	Form	Geometrische Abmessungen	ζ -Werte
13	<p data-bbox="172 544 197 696" style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Hosenstücke</p>  <p data-bbox="347 831 571 864">Bezug: w_2 oder w_3</p>	<p data-bbox="874 360 959 394">$\gamma \approx 60^\circ$</p> <p data-bbox="858 443 932 510">$\frac{A_3}{A_2} = 1$</p> <p data-bbox="858 562 954 629">$\frac{A_3}{A_1} = 0,5$</p> <p data-bbox="858 678 932 745">$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} = 1$</p> <p data-bbox="858 795 959 862">$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 0,5$</p>	2,6

Anhang C (informativ)

Einfluss der Mündung von Abgasanlagen auf benachbarte Gebäude

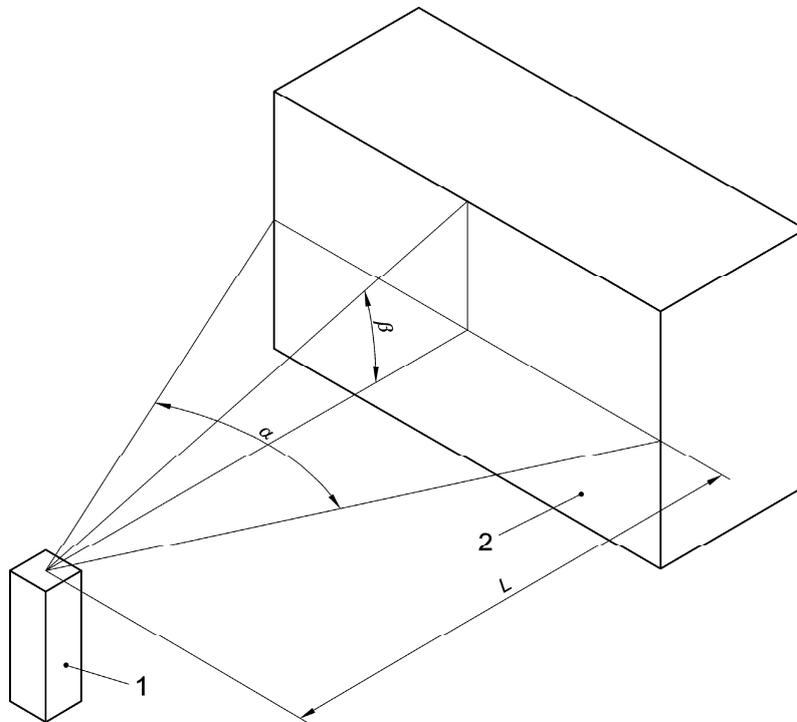


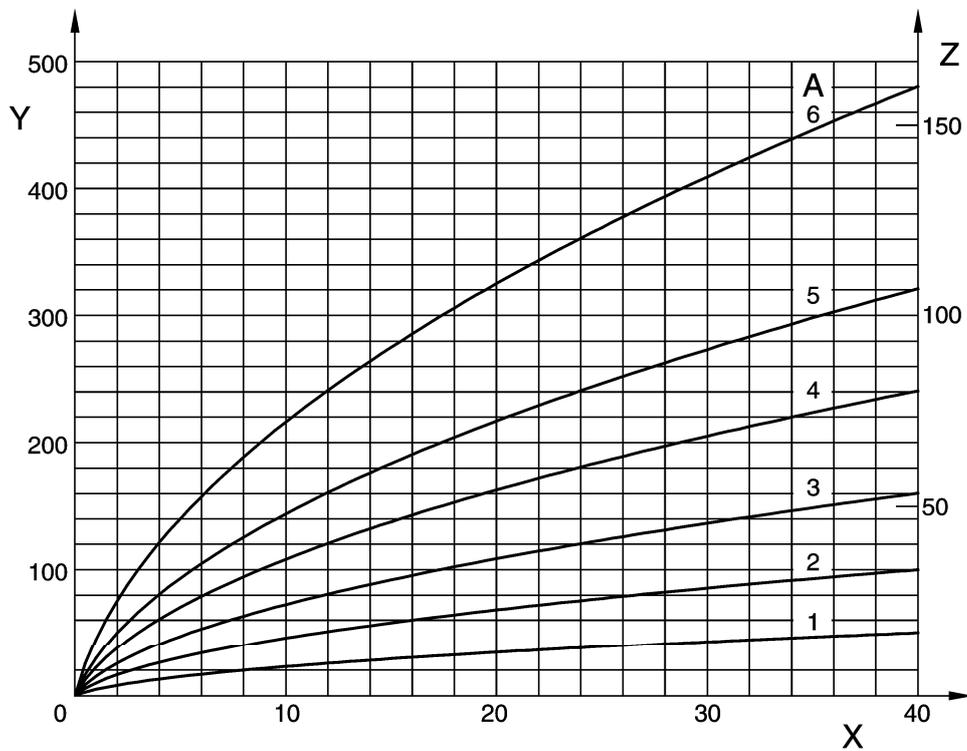
Bild C.1 — Position der Mündung einer Abgasanlage (siehe Text)

Es ist anzunehmen, dass benachbarte Gebäude einen Einfluss auf die Mündung einer Abgasanlage haben, wenn

- der horizontale Abstand L zwischen der Mündung der Abgasanlage und dem benachbarten Gebäude weniger als 15 m beträgt und
- das Gebäude, gesehen von der Mündung der Abgasanlage aus in einem Winkel α gegenüber der Horizontalen über 30° liegt und
- der Höhenwinkel von der Horizontalen der Mündung aus gesehen zum oberen Rand des Gebäudes über 10° beträgt (Winkel β).

Anhang D (informativ)

Grenzkurven für die Klassifikation der Nebenluftvorrichtungen



Legende

- A Zugbegrenzer-Gruppe
- X Differenzdruck in Pa
- Y Volumenstrom in m³/h
- Z Massenstrom in g/h

Bild D.1 — Grenzkurven für die Klassifikation von Nebenluftvorrichtungen

Anhang E (informativ)

Bestimmung der Gaskonstante R unter Berücksichtigung von Kondensation

Tabelle B.1 gibt in Gleichung (B.3) eine übliche Methode an, die Gaskonstante des R zu berechnen, indem man einen Koeffizienten f_R benutzt, der von der Art des Brennstoffes abhängt, einmal für einen Wert ohne Berücksichtigung von Kondensation und einmal für einen Wert mit Berücksichtigung der Kondensation. Die Methode für die Berechnung der Kondensation unterscheidet nicht zwischen der Intensität der Kondensation und liefert deshalb einen Wert für f_R unter Voraussetzung eines relativ hohen Wertes an Kondensat. Das Ergebnis ist ein niedriger Wert für die Gaskonstante R und für den Ruhedruck P_H .

Im Folgenden wird eine Methode zur Berechnung der Gaskonstanten R unter Berücksichtigung der Intensität der Kondensation angegeben. Diese Methode lehnt sich an die Berechnung der Kondensationswärme nach Abschnitt 8 an. Für die Bestimmung der Gaskonstanten des Abgases ist es notwendig, diese Berechnung mit der Außenlufttemperatur für die Druckbedingung anzustellen. In Abweichung von Abschnitt 8 ist es unter Sicherheitsaspekten notwendig, mit einem höheren Wert an Kondensat zu rechnen. Deshalb wird für den Berechnungsteil der Kondensationswärme für f_K ein Wert von 100 % eingesetzt. Weil nun diese Methode höhere Abgastemperaturwerte als in Wirklichkeit liefert, kann diese Methode nicht für die Bestimmung der Abgastemperaturen in der Abgasanlage oder im Verbindungsstück herangezogen werden. Für diese Berechnung können die Abschnitte 5 oder 8 angewendet werden.

Unter Berücksichtigung der Gleichung (B.11) in Tabelle B.1 gilt für eine mittlere Gaskonstante des Abgases R folgende Gleichung:

$$R = \frac{\frac{R_{o,0}}{2} + \sum_{j=1}^{N_{seg}-1} R_{o,j} + \frac{R_{o,N_{seg}}}{2}}{N_{seg}} \quad \text{in J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (\text{E.1})$$

Dabei ist

- R die mittlere Gaskonstante des Abgases, in J/(kg · K);
- $R_{o,0}$ die Gaskonstante für das Abgas am Einlass in den ersten Abschnitt, in J/(kg · K);
- $R_{o,j}$ die Gaskonstante des Abgases am Auslass des Abschnittes j , in J/(kg · K);
- $R_{o,N_{seg}}$ die Gaskonstante des Abgases am Auslass des letzten Abschnittes, in J/(kg · K);
- N_{seg} die Anzahl der Abschnitte.

Literaturhinweise

EN 1745:2000, *Mauerwerk und Mauerwerksprodukte — Verfahren zur Ermittlung von Wärmeschutzrechenwerten*

EN 12391, *Abgasanlagen — Metall-Abgasanlagen — Ausführungsbestimmungen*