
BGG 909 (bisher ZH 1/169)

Grundsätze für die Lüftungstechnische Berechnung von Kammertrocknern und Durchlauftrocknern

Fachausschuß "Oberflächenbehandlung"

April 1992

Vorbemerkung

Nach der Unfallverhütungsvorschrift "Trockner für Beschichtungsstoffe" (VBG 24) darf von Trocknern keine Gefahr durch Explosionen ausgehen.

Dieses Ziel kann durch eine nach den nachstehenden Berechnungsgrundlagen ausgelegte technische Lüftung der Trockner erreicht werden.

Diese Grundsätze enthalten die für diese Berechnung wichtigen Grundlagen sowie Berechnungsbeispiele.

1 Anwendungsbereich

Diese Grundsätze finden Anwendung für die Berechnung von Kammertrocknern und Durchlauftrocknern, bei denen der Explosionsschutz erreicht wird durch

1. technische Lüftung, die eine Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre bei allen Betriebszuständen verhindert,
oder
2. technische Lüftung und zusätzliche Maßnahmen, die die Zündung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre verhindern, wenn die Bildung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre nicht sicher verhindert werden kann.

Technische Lüftung allein wird dann als ausreichender Explosionsschutz angesehen, wenn

- die technische Lüftung entsprechend den Festlegungen dieser Grundsätze berechnet und für ungünstigste Betriebsbedingungen, z.B. erfahrungsgemäß auftretende Betriebsstörungen, ausgelegt ist
und
- ein Überschreiten der höchstzulässigen Lösemittelmenge bei der Beschickung verhindert ist.

Deshalb darf die Lösemitteldampfkonzentration im Trockner und in den angeschlossenen luftführenden Leitungen betriebsmäßig einen Grenzwert von

- 50 % der unteren Explosionsgrenze (UEG) des verwendeten Lösemittels
oder
- 20 g/m^3 (bei 20 °C), wenn die UEG des verwendeten Lösemittels nicht bekannt ist,
nicht überschreiten.

Dieser Grenzwert darf bis zu 75 % der UEG oder 30 g/m^3 (bei 20 °C) angehoben werden, wenn

- zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen getroffen sind
und
- die Erhöhung des Grenzwertes von einer anerkannten Prüfstelle für unbedenklich erklärt wird.

Hinsichtlich der festgelegten Grenzwerte für die Lösemitteldampfkonzentration ist bei der Berechnung der technischen Lüftung die Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze (UEG) zu beachten. Die UEG sinkt mit steigender Trocknungstemperatur ab (siehe Anhang 2 der "Sicherheitsregeln für den Explosionsschutz an Verbrennungsanlagen von Druck- und Papierverarbeitungsmaschinen" [ZH 1/210]).

Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme gilt z.B. die Kombination der entsprechend den Festlegungen dieser Grundsätze berechneten technischen Lüftung mit einer Überwachung der Lösemitteldampfkonzentration durch Gaswarngeräte.

Anerkannte Prüfstellen sind

- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Abt. 4, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin,
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Abt. 3, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig.

Trotz Auslegung der Lüftung entsprechend den Festlegungen dieser Grundsätze und bestimmungsgemäßer Beschickung kann in Trocknern unter bestimmten Bedingungen gefährliche explosionsfähige Atmosphäre entstehen. Dies ist bei Durchlauftrocknern insbesondere der Fall, wenn durch Störungen an vorgeschalteten Auftrageinrichtungen, z.B. beim Abheben der Rakel oder bei Vergrößerung des Walzenspaltes, soviel Beschichtungsstoff aufgetragen wird, daß der höchstzulässige Lösemitteldurchsatz überschritten wird.

Ausreichender Explosionsschutz wird bei Durchlauftrocknern in diesen Fällen dadurch erreicht, daß

- die technische Lüftung entsprechend den Festlegungen dieser Grundsätze berechnet und ausgelegt ist
und
- Maßnahmen zur Vermeidung der Zündung explosionsfähiger Atmosphäre im Hinblick auf mögliche Betriebsstörungen (Überschreitung des höchstzulässigen Lösemitteldurchsatzes) getroffen sind.

Eine Vermeidung der Zündung im Hinblick auf mögliche Betriebsstörungen wird für Durchlauftrockner erreicht, wenn

1. für die Berechnung der Lüftung im Gesamtdampfraum des Trockners 50 % der UEG des verwendeten Lösemittels zugrundegelegt werden und Schutzmaßnahmen nach den Anforderungen der Zone 1 getroffen sind ($T < \text{Grenztemperatur}$),
2. für die Berechnung der Lüftung im Nutzraum des Trockners 25 % der UEG des verwendeten Lösemittels zugrundegelegt werden und Schutzmaßnahmen nach den Anforderungen der Zone 2 getroffen sind ($\text{Grenztemperatur} < T \leq \text{Zündtemperatur}$).

Dabei ist die Temperaturabhängigkeit der UEG zu beachten.

Explosionsgefährdete Bereiche werden nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen eingeteilt (siehe "Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung – Explosionsschutz-Richtlinien – [EX-RL]" [ZH 1/10]).

Im Fall 1 darf im Bereich der Zone 1 die Temperatur der Heizflächen die Grenztemperatur nicht überschreiten. Im Fall 2 darf im Nutzraum (Zone 2) die Temperatur höchstens die Zündtemperatur erreichen.

Die Zündtemperatur eines brennbaren Gases oder einer brennbaren Flüssigkeit ist die in einer vorgeschriebenen Versuchsanordnung ermittelte niedrigste Temperatur einer erhitzten Wand, bei der sich das zündwilligste Gas-Luft- oder Dampf-Luft-Gemisch gerade noch entzünden läßt.

Die Zündtemperatur gestattet, brennbare Gase und Dämpfe nach ihrer Entzündbarkeit an

erhitzten Wänden in Temperaturklassen einzuteilen. Festlegung und Anwendung der Temperaturklassen siehe DIN VDE 0765 "Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen".

Es bestehen keine Beschränkungen der Temperatur außerhalb der explosionsgefährdeten Bereiche.

Die Berechnung berücksichtigt auch die Betriebszustände "An- und Abfahren" von Durchlauftrocknern.

2 Begriffsbestimmungen

2.1 **Trockner** für Beschichtungsstoffe sind Einrichtungen zum Trocknen von flüssigen Beschichtungsstoffen.

Zu den Trocknern zählen auch Trocknungskabinen und kombinierte Spritz- und Trocknungskabinen im Trocknungsbetrieb.

2.2 **Kammertrockner** sind geschlossene Trockner mit chargenweiser Beschickung. Kammertrockner werden auch Schrank- oder Standtrockner genannt.

Zu den Kammertrocknern zählen auch Labortrockner, soweit in ihnen flüssige Beschichtungsstoffe (Lacke) getrocknet werden.

Siehe auch

- "Richtlinien für Laboratorien" (ZH 1/119),
- DIN 12 880 Teil 1 "Elektrische Laborgeräte; Wärmeschränke; Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen, Allgemeine technische Anforderungen".
- E DIN VDE 0411 Teil 100 "Sicherheitsbestimmungen für elektrisch betriebene Meß-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte; Allgemeine Anforderungen".

2.3 **Durchlauftrockner** sind Trockner mit durchlaufender Beschickung.

Durchlauftrockner für flache Güter oder von Rollen ablaufendes Gut werden als Flachbahntrockner bezeichnet.

2.4 **Explosionsfähige Atmosphäre** umfaßt explosionsfähige Gemische von Lösemitteldämpfen mit Luft einschließlich üblicher Beimengungen.

Der Begriff "explosionsfähige Atmosphäre" setzt voraus, daß atmosphärische Bedingungen vorliegen. Als solche gelten Gesamtdrücke von 0,8 bar bis 1,1 bar und Gemischtemperaturen von -20 °C bis +60 °C. Als übliche Beimengung ist Feuchte zu verstehen.

Im Falle der Trocknung von Beschichtungsstoffen liegen die auftretenden Lösemitteldämpfe nicht in dem Temperaturbereich, für den die in Tabellenwerken enthaltenen Kenngrößen gelten. Dies gilt insbesondere für die untere Explosionsgrenze, für die deshalb entsprechend der jeweiligen Trocknungstemperatur eine Korrektur erforderlich ist.

Siehe auch "Explosionsschutz-Richtlinien (EX-RL)" (ZH 1/10) und DIN VDE 0165.

2.5 **Untere Explosionsgrenze**, auch untere Zündgrenze genannt (**UEG**), ist der untere Grenzwert der Konzentration eines brennbaren Stoffes in einem Gemisch von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben mit Luft, in dem sich nach dem Zünden eine von der Zündquelle unabhängige Flamme gerade nicht mehr selbständig fortpflanzen kann.

Werte für die untere Explosionsgrenze (UEG) von Lösemitteln können entnommen werden aus

Nabert/Schön: "Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe".
(Deutscher Eichverlag, Braunschweig)

Ist bei Lösemittelgemischen (Zubereitungen) die untere Explosionsgrenze nicht bekannt, muß zur Festlegung der erforderlichen technischen Lüftung von der unteren Explosionsgrenze der Lösemittelkomponente ausgegangen werden, deren untere Explosionsgrenze den niedrigsten

Wert hat.

Wenn nicht bekannt ist, welche Lösemittel verwendet werden ist als untere Explosionsgrenze (UEG) 40 g/m^3 (bezogen auf Luft bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$) zu setzen.

- 2.6 **Mindestabluftvolumenstrom** im Sinne dieser Grundsätze ist der bei allen bestimmungsgemäßen Betriebsverhältnissen noch zu gewährleistende Abluftvolumenstrom.
- 2.7 **Eingebrachte Lösemittelmenge** ist die gesamte in einem Kammertrockner je Charge beim Trockenvorgang freigesetzte Lösemittelmenge. Sie kann aus der aufgetragenen Lackmenge und dem Lösemittelgehalt des Lackes unter Berücksichtigung des Vortrocknungsverlustes (siehe Abschnitt 2.11) bestimmt werden.
- 2.8 **Höchstzulässige Lösemittelmenge** im Sinne dieser Grundsätze ist die Lösemittelmenge, die je Kammertrocknerfüllung bei völlig geöffneter Drosselklappe und bei jeweiliger Trocknungstemperatur eingebracht werden darf.
- 2.9 **Lösemitteldurchsatz** ist die in einen Durchlaufrockner pro Zeiteinheit einlaufende Lösemittelmenge. Sie kann aus der aufgetragenen Lackmenge, dem Lösemittelgehalt und der Transportgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Vortrocknungsverlustes bestimmt werden.
- 2.10 **Höchstzulässiger Lösemitteldurchsatz** im Sinne dieser Grundsätze ist die sich für einen Durchlaufrockner aus dem Mindestabluft-Volumenstrom ergebende höchstzulässige Lösemittelmenge pro Zeiteinheit bei jeweiliger Trocknungstemperatur.
- 2.11 **Höchstzulässige Lösemitteldampfkonzentration** im Sinne dieser Grundsätze ist die Lösemitteldampfkonzentration im Gesamtdampfraum des Trockners, die aus sicherheitstechnischen Gründen nicht überschritten werden darf.
- 2.12 Vortrocknungsverlust ist die Verminderung der Lösemittelmenge bzw. des Lösemitteldurchsatzes vor dem Einbringen des beschichteten Gutes in den Trockner durch das Trocknen an der Luft.

Bei oberflächenbeschichteten Teilen kann dieser Vortrocknungsverlust mit folgenden Werten angesetzt werden: Nach einer mittleren Vortrocknungszeit von

- 10 Minuten zu 25 %,
- 20 Minuten zu 45 %,
- 30 Minuten zu 50 %

der aufgetragenen Lösemittelmenge.

Bei der Formlacktrocknung kann der Vortrocknungsverlust mit folgenden Werten angesetzt werden:

Nach einer mittleren Vortrocknungszeit von

- 10 Minuten zu 15 %,
- 20 Minuten zu 25 %,
- 30 Minuten zu 35 %,
- 40 Minuten zu 40 %,
- 50 Minuten zu 45 %,
- 60 Minuten zu 50 %

der aufgetragenen Lösemittelmenge.

Als mittlere Vortrocknungszeit gilt bei Kammertrocknern die Hälfte der Zeit, die zum Beschichten des Gutes für eine Trocknerfüllung (Charge) gebraucht wird, zuzüglich einer etwaigen Wartezeit nach dem Beschichten des Gutes bis zum Einbringen in den Trockner.

- 2.13 **Trocknungstemperatur** ist die Lufttemperatur im Trockner, bei der der jeweilige Beschichtungsstoff getrocknet wird. Bei Infrarot-Beheizung ist die Trocknungstemperatur die am Abluftstutzen des Trockners gemessene Ablufttemperatur zuzüglich 50 °C.
- 2.14 **Gesamtdampfraum** ist der gesamte Raum innerhalb des Trockners, in dem Lösemitteldämpfe vorhanden sein können. Der Gesamtdampfraum schließt die Umluftleitungen ein und endet am Abluftstutzen des Trockners.
- Der Gesamtdampfraum ist also größer als der Nutzraum des Trockners. Wenn das Volumen z.B. des eingebrachten beschichteten Gutes, seiner Horden, Transportmittel 10 % des Nutzraumes überschreitet, muß es bei der Errechnung des Gesamtdampfraumes abgezogen werden.

3 Berechnung von Kammertrocknern

3.1 Berechnungsgrundlagen für Kammertrockner

Es sollen bedeuten

G_{ges}	[g]	Gesamte in den Trockner eingebrachte Lösemittelmenge (Gesamtlösemittelmenge) (siehe Abschnitt 2.7).
$D_{ges,\delta}$	[m ³]	Gesamtes in den Trockner eingebrachtes Lösemitteldampfvolumen bei Trocknungstemperatur.
M	[g/mol]	Molare Masse des Lösemittels bzw. mittlere molare Masse des Lösemittelgemisches; ist die Zusammensetzung des Lösemittelgemisches nicht bekannt, kann als Mittelwert 100 g/mol angesetzt werden, da das mittlere Molekulargewicht der Lösemittel zwischen 60 und 150 liegt. Da eine genaue Bestimmung meistens nicht möglich ist, muß mit dem Mittelwert 100 gerechnet werden. (Dies ist bei der Umrechnung der unteren Explosionsgrenze nicht zulässig).
δ	[°C]	Jeweilige Trocknungstemperatur (siehe Abschnitt 2.13).
V	[m ³]	Gesamtdampfraum des Trockners (siehe Abschnitt 2.14).
$C_{ges,\delta}$	[m ³ /m ³]	Volumenkonzentration des Lösemitteldampfes im Gesamtdampfraum bei Trocknungstemperatur nach Verdampfen der Gesamtlösemittelmenge ohne Luftaustausch.
U	[g/m ³]	Untere Explosionsgrenze des Lösemittels bzw. Lösemittelgemisches bei 20 °C (293 K). Ist die untere Explosionsgrenze nur als Volumenkonzentration in % (alte Bezeichnung Vol.-%) und auch die berechnete molare Masse des Lösemittels bzw. die mittlere molare Masse des Lösemittelgemisches bekannt, kann die Volumenkonzentration nach der Formel

$$U \left(\text{g/m}^3 \right) = \frac{M \left(\text{g/mol} \right)}{100 \cdot 0,0241 \left(\text{m}^3/\text{mol} \right)} \cdot U \left(\text{Vol.-Konz. in \%} \right)$$

umgerechnet werden (0,0241 m³/mol = Molvolumen bei 20

°C). Bei dieser Umrechnung darf für die molare Masse nicht der angenommene Mittelwert von 100 g/mol eingesetzt werden (siehe auch Abschnitt 2.5).

U_{δ}	$[g/m^3]$	Untere Explosionsgrenze des Lösemittels bzw. des Lösemittelgemisches bei Trocknungstemperatur.
k_{zul}		Sicherheitsfaktor, der den zwischen höchstzulässiger Lösemitteldampfkonzentration im Trockner und der unteren Explosionsgrenze des Lösemittels bzw. Lösemittelgemisches aufgrund der getroffenen Explosionsschutzmaßnahmen erforderlichen Sicherheitsabstand festlegt. Es ist $k_{zul} = 0,5$ einzusetzen. Bei Trocknern nach Abschnitt 1 Nr. 1 kann in geprüften Ausnahmefällen ein höherer Wert eingesetzt werden: $0,5 < k_{zul} \leq 0,75$. Bei Trocknern nach Abschnitt 1 Nr. 2 mit Heizflächentemperaturen oberhalb der Grenztemperatur ist $k_{zul} = 0,25$.
$C_{zul,\delta}$	$[m^3/m^3]$	Höchstzulässige Lösemitteldampfkonzentration bei Trocknungstemperatur (siehe Abschnitt 2.11).
t_0	$[h]$	Theoretische Verdampfungszeit der gesamten in den Trockner eingebrachten Lösemittelmenge bei Trocknungstemperaturen unter der fiktiven Annahme, daß die Anfangsverdampfungs-geschwindigkeit während des ganzen Trocknungsvorganges konstant bleibt.
t_w	$[h]$	Zeit für einen Luftwechsel im Gesamtdampfraum des Trockners.
$\dot{V}_{min,\delta}$	$[m^3/h]$	Mindestluftvolumenstrom bei Trocknungstemperatur, gemessen unter Berücksichtigung der Strömungswiderstände im Trockner und in den Luftleitungen.

Die lüftungstechnische Berechnung der Kammertrockner ist nach folgenden Gleichungen durchzuführen:

Die eingebrachte Lösemittelmenge G_{ges} wird bei gegebener Trocknungstemperatur auf das Lösemitteldampfvolumen $D_{ges,\delta}$ umgerechnet

$$D_{ges,\delta} = \frac{G_{ges} \cdot 0,0241 \cdot (273 + \delta)}{M \cdot 293} \quad (1)$$

Die Volumenkonzentration des Lösemitteldampfes $C_{ges,\delta}$ im Gesamtdampfraum V des Trockners ergibt sich bei Trocknungstemperatur zu

$$C_{ges,\delta} = \frac{D_{ges,\delta}}{V} \quad (2)$$

Für die höchstzulässige Lösemitteldampfkonzentration $C_{zul, \delta}$ bei Trocknungstemperatur gilt

$$C_{zul, \delta} = \frac{0,0241 \cdot (273 + \delta) \cdot U_{\delta} \cdot k_{zul}}{293 \cdot M} \quad (3)$$

wobei die untere Explosionsgrenze U_{δ} bei Trocknungstemperatur aus der unteren Explosionsgrenze U bei 20 °C nach

$$U_{\delta} = U \left[1 - 0,0014 (\delta - 20) \right] \cdot \frac{293}{(273 + \delta)} \quad (4)$$

berechnet werden kann.

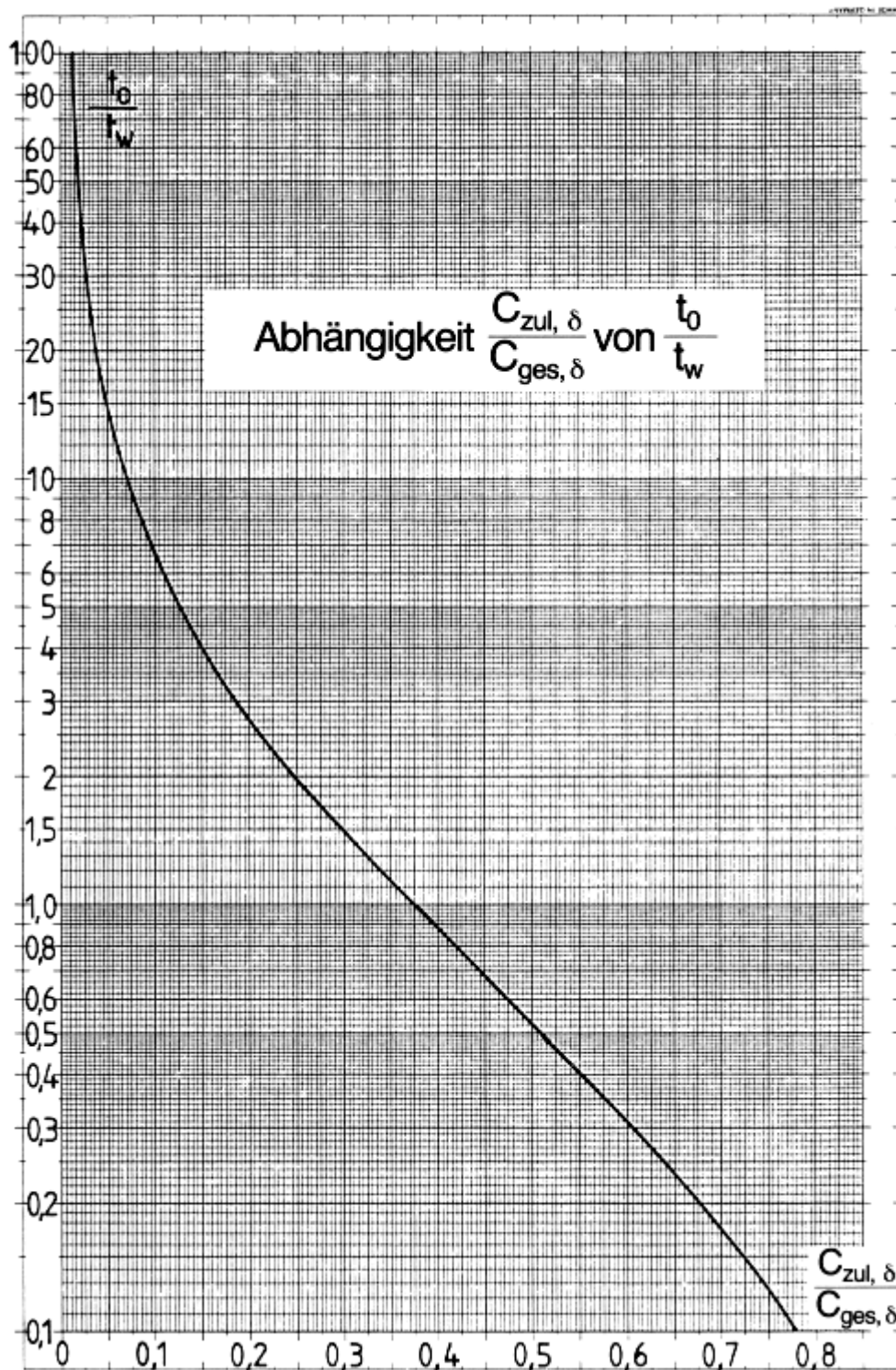
Setzt man Gleichung (4) in Gleichung (3) ein, erhält man

$$C_{zul, \delta} = \frac{0,0241 \cdot U \cdot \left[1 - 0,0014 (\delta - 20) \right] \cdot k_{zul}}{M} \quad (5)$$

Die Abhängigkeit

$$\frac{C_{zul, \delta}}{C_{ges, \delta}} \text{ von } \frac{t_0}{t_w} \quad (6)$$

ist graphisch auf dem nachfolgenden Kurvenblatt (Seite 12) dargestellt und jeweils dort zu entnehmen.



Die Abhängigkeit kann auch nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\text{Es sei } \gamma = \frac{C_{zul, \delta}}{C_{ges, \delta}} \text{ und } \tau = \frac{t_0}{t_w}$$

Liegt τ vor, ist

$$\gamma = \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{\ln \tau}{\tau-1}}$$

(7)

Ist hingegen τ zu ermitteln, können folgende Näherungsgleichungen verwendet werden:

Sofern $\gamma \leq 0,3$,

gilt

$$\ln \tau = -1,3226 - 1,4469 \ln \gamma - 0,0299 (\ln \gamma)^2; \quad (8)$$

ist jedoch $\gamma > 0,3$,

gilt

$$\ln \tau = 1,6284 - 3,7003 \gamma - 1,6627 \gamma^2. \quad (9)$$

Weiter gilt für die Berechnung der theoretischen Verdampfungszeit t_0 der gesamten in den Trockner eingebrachten Lösemittelmenge bei Trocknungstemperatur δ

$$t_0 = \frac{2,58}{\delta}, \quad (10)$$

für die Zeit t_w für einen Luftwechsel im Gesamtdampfraum V des Trockners

$$t_w = \frac{V}{\dot{V}_{\min, \delta}} \quad (11)$$

und damit für den Mindestabluftvolumenstrom bei Trocknungstemperatur $\dot{V}_{\min, \delta}$

$$\dot{V}_{\min, \delta} = \frac{V}{t_w}. \quad (12)$$

3.2 Berechnungsbeispiele für Kammertrockner

3.2.1 Beispiel 1:

Berechnung des notwendigen Mindestabluftvolumenstromes (siehe Abschnitt 2.6)

In einem Kammertrockner mit einem Gesamtdampfraum von $1,5 \text{ m}^3$ werden mit 130 g Lack beschichtete Teile zum Trocknen bei einer Trocknungstemperatur von $150 \text{ }^\circ\text{C}$ eingebracht. Die Beschichtung der Teile, die als Charge gleichzeitig in den Trockner gebracht werden, dauert 40 min , wobei der Lösemittelanteil des Lackes 50% ist.

Wie groß ist der Mindestabluftvolumenstrom, wenn die molare Masse und die untere Explosionsgrenze der verwendeten Lösemittel nicht bekannt sind und als Sicherheitsfaktor $k_{zul} = 0,5$ gilt?

Als mittlere Vortrocknungszeit (siehe Abschnitt 2.12) ergibt sich die Hälfte der Beschichtungszeit zu 20 min und damit der Vortrocknungsverlust zu 45% . Bei 130 g Frischlack mit 50% Lösemittelanteil ergeben sich

$$\frac{130 \cdot 50}{100} \text{ g Lösemittel im Frischlack,}$$

von denen unter Berücksichtigung des Vortrocknungsverlustes von 45 % dann

$$\frac{(100 - 45) \cdot 130 \cdot 50}{100 \cdot 100} = 35,75 \text{ g Lösemittel}$$

in den Kammertrockner eingebracht werden.

Aus Gleichung (1) ergibt sich das eingebrachte Lösemitteldampfvolumen

$$D_{\text{ges}, \delta} \frac{0,0241 \cdot 35,75 \cdot (273 + 150)}{100 \cdot 293} = 0,0124 \text{ m}^3$$

und gemäß Gleichung (2) ist die Volumenkonzentration des Lösemitteldampfes im Gesamtdampfraum

$$C_{\text{ges}, \delta} \frac{0,0124}{1,5} = 0,0083 \text{ m}^3/\text{m}^3.$$

Man erhält aus Gleichung (5) die höchstzulässige Lösemitteldampfkonzentration im Trockner zu

$$C_{\text{zul}, \delta} \frac{0,0241 \cdot 40 \cdot [1 - 0,0014 (150 - 20)] \cdot 0,5}{100} = 0,00394 \text{ m}^3/\text{m}^3.$$

Als Verhältniswert ergibt sich

$$\frac{C_{\text{zul}, \delta}}{C_{\text{ges}, \delta}} = \frac{0,00349}{0,0083} = 0,475.$$

Dafür ist dem vorstehenden Kurvenblatt (siehe Seite 12) zu entnehmen

$$\frac{t_0}{t_w} = 0,6.$$

Da nach Gleichung (10)

$$t_0 = \frac{2,58}{150} = 0,0172 \text{ h ist,}$$

folgt

$$t_w = \frac{0,0172}{0,6} = 0,0287 \text{ h.}$$

Nach Gleichung (8) erhält man für den Mindestabluftvolumenstrom

$$\dot{V}_{\text{min}, \delta} = \frac{1,5}{0,0287} = \mathbf{52,3 \text{ m}^3/\text{h}}.$$

Bei der Messung des Abluftvolumenstromes bei Trocknungstemperatur muß also ein Mindestwert von 52 m³/h festgestellt werden.

3.2.2 Beispiel 2:

Berechnung des notwendigen Mindestabluft-Volumenstromes (siehe Abschnitt 2.6)

In einem Kammertrockner mit einem Gesamtdampfraum von 19,5 m³ werden lackierte Gegenstände mit einer Gesamtlösemittelmenge von 1100 g zum Trocknen bei einer Trocknungstemperatur von 180 °C eingebracht.

Wie groß muß der notwendige Mindestabluftvolumenstrom sein?

Die untere Explosionsgrenze des verwendeten Lösemittelgemisches sei nicht bekannt und ist somit gleich 40 g/m^3 zu setzen. Die molare Masse des Lösemittelgemisches sei ebenfalls unbekannt, daher ist als Mittelwert $M = 100 \text{ g}$ anzusetzen. Der Sicherheitsfaktor ist $k_{\text{zul}} = 0,5$.

Aus der Gleichung (1) ergibt sich für das eingebrachte Lösemitteldampfvolumen

$$D_{\text{ges}, \delta} = \frac{0,0241 \cdot (273 + 180) \cdot 1100}{293 \cdot 100} = 0,4099 \text{ m}^3.$$

Gemäß Gleichung (2) ist die Volumenkonzentration des Lösemitteldampfes im Gesamtdampfraum

$$C_{\text{ges}, \delta} = \frac{0,4099}{19,5} = 0,0210 \text{ m}^3/\text{m}^3.$$

Aus Gleichung (5) erhält man die höchstzulässige Lösemitteldampfkonzentration im Trockner zu

$$C_{\text{zul}, \delta} = \frac{0,0241 \cdot 40 \cdot [1 - 0,0014(180 - 20)] \cdot 0,5}{100} = 0,0037 \text{ m}^3/\text{m}^3.$$

Als Verhältniswert ergibt sich

$$\frac{C_{\text{zul}, \delta}}{C_{\text{ges}, \delta}} = \frac{0,0037}{0,0210} = 0,1762.$$

Dafür ist aus dem vorstehenden Kurvenblatt (siehe Seite 12) zu entnehmen:

$$\frac{t_0}{t_w} = 3,2.$$

Da nach Gleichung (10)

$$t_0 = \frac{2,58}{180} = 0,0143 \text{ h},$$

ist folglich

$$t_w = \frac{0,0143}{3,2} = 0,0045 \text{ h}.$$

Nach Gleichung (12) erhält man somit für den Mindestabluftvolumenstrom

$$\dot{V}_{\text{min}, \delta} = \frac{19,5}{0,0045} = 4333 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Bei der Messung des Abluftvolumenstromes bei Trocknungstemperatur muß also ein Mindestwert von $4333 \text{ m}^3/\text{h}$ festgestellt werden.

3.2.3 Beispiel 3:

Berechnung der höchstzulässigen Lackmenge (siehe Abschnitt 2.8)

In einem Kammertrockner mit einem Gesamtdampfraum von $36,8 \text{ m}^3$ sollen lackierte Gegenstände bei einer Trocknungstemperatur von $210 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet werden; bei dieser Trocknungstemperatur wurden als Mindestabluft-Volumenstrom $2100 \text{ m}^3/\text{h}$ gemessen.

Wieviel Lack darf maximal bei einer Charge aufgebracht werden, wenn er einen Massenanteil 60 % Lösemittel enthält und die mittlere Vortrocknungszeit an der Luft 20 min beträgt?

Da die untere Explosionsgrenze und die molare Masse des Lösemittels unbekannt sind,

werden $U = 40 \text{ g/m}^3$ und $M = 100 \text{ g}$ eingesetzt. Außerdem ist $k_{zul} = 0,5$.

Bei einer Trocknungstemperatur von 210 °C ergibt sich aus Gleichung (7) eine Verdampfungszeit von

$$t_0 = \frac{2,58}{210} = 0,0123 \text{ h.}$$

Die Zeit für einen Luftwechsel im Gesamtdampfraum des Trockners erhält man aus Gleichung (8) zu

$$t_w = \frac{36,8}{2100} = 0,0175 \text{ h.}$$

Damit ist das Verhältnis

$$\frac{t_0}{t_w} = \frac{0,0123}{0,0175} = 0,7029.$$

Aus dem vorstehenden Kurvenblatt (siehe Seite 12) ist hierfür zu entnehmen

$$\frac{C_{zul, \delta}}{C_{ges, \delta}} = 0,445.$$

Da nach Gleichung (5)

$$C_{zul, \delta} = \frac{0,0241 \cdot 40 \cdot [1 - 0,0014(210 - 20)] \cdot 0,5}{100} = 0,0035 \text{ m}^3/\text{m}^3,$$

ergibt sich aus dem obigen Verhältnis für

$$C_{ges, \delta} = \frac{0,0035}{0,445} = 0,0079 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

und nach Gleichung (2) für

$$D_{ges, \delta} = C_{ges, \delta} \cdot V = 0,0079 \cdot 36,8 = 0,2907 \text{ m}^3.$$

Folglich ist nach der Gleichung (1) die gesamte einzubringende Lösemittelmenge

$$G_{ges} = \frac{D_{ges, \delta} \cdot M \cdot 293}{0,0241 \cdot (273 + \delta)} = \frac{0,2907 \cdot 100 \cdot 293}{0,0241 \cdot (273 + 210)} = 732 \text{ g}$$

Bei einer mittleren Vortrocknungszeit von 20 min ist nach Abschnitt 2.11 ein Vortrocknungsverlust von 45 % anzusetzen. Somit entspricht G_{ges} 55 % der im Beschichtungsstoff vor der Vortrocknung enthaltenen Lösemittelmenge, d.h. es können als höchstzulässige Lösemittelmenge

$$\frac{732 \cdot 100}{55} = 1331 \text{ g Lösemittel}$$

in dem aufgetragenen Lack enthalten sein.

Bei einem Lösemittelanteil des Lackes von 60 % ergeben sich somit

$$\frac{1331 \cdot 100}{60} = \mathbf{2218 \text{ g Lack.}}$$

Bei einer Charge dürfen also maximal 2218 g Lack aufgetragen sein.

4 Berechnung von Durchlauftrocknern

4.1 Berechnungsgrundlagen für Durchlauftrockner

Es sollen bedeuten

G_{\max}	[g/h]	Höchster Lösemitteldurchsatz; d.h. maximale Lösemittelmenge, die je Stunde in den Trockner eingebracht wird (siehe Abschnitt 2.10) bzw. im Trockner freigesetzt wird.
$D_{\max, \delta}$	[m ³ /h]	Höchster Lösemitteldampfdurchsatz; d. h. maximales Lösemitteldampfvolumen, das bei Trocknungstemperatur je Stunde in den Trockner eingebracht wird oder in ihm freigesetzt wird.
$C_{\text{zul}, \delta}$	[m ³ /m ³]	Höchstzulässige Lösemitteldampfkonzentration im Trockner bei Trocknungstemperatur (siehe Abschnitt 2.11).
$\dot{V}_{\text{min}, \delta}$	[m ³ /h]	Mindestabluft-Volumenstrom bei Trocknungstemperatur, gemessen unter Berücksichtigung der Strömungswiderstände im Trockner und in den Luftleitungen.
δ	[°C]	Jeweilige Trocknungstemperatur (siehe Abschnitt 2.13).
U	[g/m ³]	Untere Explosionsgrenze des Lösemittels bzw. des Lösemittelgemisches bei 20 °C (293 K). Ist die untere Explosionsgrenze nur als Volumenkonzentration in % (alte Bezeichnung Vol.-%) und auch die molare Masse des Lösemittelgemisches bekannt, so kann die Volumenkonzentration nach der Formel
$U \text{ (g/m}^3\text{)} = \frac{M \text{ (g/mol)}}{100 \cdot 0,0241 \text{ (m}^3\text{/mol)}} \cdot U \text{ (Vol.-Konz. in \%)}$		
umgerechnet werden (0,0241 m ³ /mol = Molvolumen bei 20 °C). Bei dieser Umrechnung darf für die molare Masse nicht der Mittelwert von 100 g/mol eingesetzt werden (siehe auch Abschnitt 2.5).		
U_{δ}	[g/m ³]	Untere Explosionsgrenze des Lösemittels bzw. des Lösemittelgemisches bei Trocknungstemperatur.

- k_{zul} Sicherheitsfaktor, der den zwischen höchstzulässiger Lösemitteldampfkonzentration im Trockner und der unteren Explosionsgrenze des Lösemittels bzw. Lösemittelgemisches aufgrund der getroffenen Explosionsschutzmaßnahmen erforderlichen Sicherheitsabstand festlegt.
Es ist $k_{zul} = 0,5$ einzusetzen.
Bei Trocknern nach Abschnitt 1 Nr. 1 kann in geprüften Ausnahmefällen ein höherer Wert eingesetzt werden:
 $0,5 < k_{zul} \leq 0,75$
Bei Trocknern nach Abschnitt 1 Nr. 2 mit Heizflächentemperaturen oberhalb der Grenztemperatur ist $k_{zul} = 0,25$.
- f Lüftungsbeiwert ($f \geq 1$), der die Qualität der Luftführung berücksichtigt.
Der Lüftungsbeiwert ist mit 1 anzusetzen, sofern nicht aufgrund ungünstiger Luftführung Toträume entstehen können und somit ein größerer Beiwert erforderlich ist.

Die lüftungstechnische Berechnung der Durchlauftrockner ist nach folgenden Gleichungen durchzuführen.

Die maximale Lösemittelmenge, die je Stunde in den Trockner eingebracht wird, wird bei gegebener Trocknungstemperatur auf das Lösemitteldampfvolumen $D_{max, \delta}$ umgerechnet ($0,0241 \text{ m}^3/\text{mol} = \text{Molvolumen bei } 20 \text{ }^\circ\text{C}$)

$$D_{max, \delta} = \frac{G_{max} \cdot 0,0241 \cdot (273 + \delta)}{M \cdot 293} \quad (1)$$

Die höchstzulässige Lösemitteldampfkonzentration im Trockner bei Trocknungstemperatur ergibt sich zu

$$C_{zul, \delta} = \frac{0,0241 \cdot (273 + \delta) \cdot U_{\delta} \cdot k_{zul}}{293 \cdot M} \quad (2)$$

wobei die untere Explosionsgrenze bei Trocknungstemperatur aus der unteren Explosionsgrenze bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ errechnet werden kann nach

$$U_{\delta} = U \cdot \left[1 - 0,0014 (\delta - 20) \right] \cdot \frac{293}{273 + \delta} \quad (3)$$

Setzt man Gleichung (3) in Gleichung (2) ein, erhält man

$$C_{zul, \delta} = \frac{0,0241 \cdot U \cdot \left[1 - 0,0014 (\delta - 20) \right] \cdot k_{zul}}{M} \quad (4)$$

Der Mindestabluftvolumenstrom ist bestimmt durch

$$\dot{V}_{\min, \delta} = \frac{f \cdot D_{\max, \delta}}{C_{\text{zul}, \delta}} \quad (5)$$

Der Mindestabluftvolumenstrom bei Trocknungstemperatur ermittelt sich also bei vorgegebenem höchsten Lösemitteldurchsatz durch Einsetzen von Gleichung (1) und (4) in Gleichung (5) nach

$$\dot{V}_{\min, \delta} = \frac{f \cdot G_{\max} \cdot (273 + \delta)}{U \cdot [1 - 0,0014 (\delta - 20)] \cdot k_{\text{zul}} \cdot 293} \quad (6)$$

Daraus ergibt sich der höchste Lösemitteldurchsatz, der bei vorgegebenem Abluftvolumenstrom in den Durchlauftrockner eingegeben werden darf, zu

$$G_{\max} = \frac{Q_{\min, \delta} \cdot U \cdot [1 - 0,0014 (\delta - 20)] \cdot k_{\text{zul}} \cdot 293}{f \cdot (273 + \delta)} \quad (7)$$

Ist der Durchlauftrockner in Trocknungszonen (Lüftungsabschnitte) unterteilt, ist die vorstehende Lüftungstechnische Berechnung für jede Zone unter Zugrundelegung der in dieser Zone je Stunde maximal freigesetzten Lösemittelmenge entsprechend durchzuführen. In vielen Fällen reichen zur Bestimmung des Abdampfverhaltens der Lösemittel die Angaben der Lackhersteller aus. In Zweifelsfällen sind die erforderlichen Daten durch Messungen zu ermitteln.

4.2 Berechnungsbeispiele für Durchlauftrockner

4.2.1 Beispiel 1:

Berechnung des Mindestabluftvolumenstromes für einen 2-Zonen-Durchlauftrockner (siehe Abschnitt 2.6)

In einem 2-Zonen-Durchlauftrockner sollen Stahblechteile unterschiedlicher Oberflächengröße bei einer Trocknungstemperatur von 160 °C getrocknet werden. Der maximale Lösemitteldurchsatz beträgt 48 kg/h, wenn im ungünstigsten Fall nur große Teile durchgesetzt werden. Zwischen Beschichten und Trocknen liegt eine Abdunstzeit von 10 min. Der Lüftungsbeiwert des Trockners beträgt $f = 1$. Nach Kenntnis von Temperaturverlauf und Abdunstverhalten der Lösemittel ist anzunehmen, daß 90 % der Lösemittel in der 1. Trocknungszone und 10 % der Lösemittel in der 2. Trocknungszone abdunsten. Die untere Explosionsgrenze des verwendeten Lösemittelgemisches ist nicht exakt bekannt und daher mit 40 g/m^3 anzusetzen. Der Sicherheitsfaktor k_{zul} beträgt 0,5.

Unter Berücksichtigung der Vortrocknungsverluste von 25 % bei 10 min ergibt sich als maximaler Lösemitteldurchsatz

$$G_{\max} = \frac{48000 \cdot (100 - 25)}{100} = 36000 \text{ g/h}$$

und damit

für die 1. Trocknungszone

$$G_{\max} = \frac{36000 \cdot 90}{100} = 32400 \text{ g/h.}$$

für die 2. Trocknungszone

$$G_{\max} = \frac{36000 \cdot 10}{100} = 3600 \text{ g/h.}$$

Der Mindestabluftvolumenstrom bei Trocknungstemperatur ergibt sich aus Gleichung (6)

für die 1. Trocknungszone

$$\dot{V}_{\min, \delta} = \frac{32400 \cdot (273 + 160) \cdot 1}{40 \cdot [1 - 0,0014 \cdot (160 - 20)] \cdot 0,5 \cdot 293} = \mathbf{2978 \text{ m}^3/\text{h}}$$

für die 2. Trocknungszone

$$\dot{V}_{\min, \delta} = \frac{3600 \cdot (273 + 160) \cdot 1}{40 \cdot [1 - 0,0014 \cdot (160 - 20)] \cdot 0,5 \cdot 293} = \mathbf{331 \text{ m}^3/\text{h}}$$

4.2.2 Beispiel 2:

Berechnung des höchstzulässigen Lösemitteldurchsatzes (siehe Abschnitt 2.10)

In einem Durchlauftrockner sollen bedruckte Gewebepapieren bei einer Trocknungstemperatur von 150 °C getrocknet werden. Als Lösemittel wird dabei Testbenzin 145/200 eingesetzt. Der Mindestabluftvolumenstrom beträgt 24060 m³, gemessen bei Trocknungstemperatur.

Welche Menge an Testbenzin 145/200 darf stündlich maximal in den Durchlauftrockner eingebracht werden?

Als Sicherheitsfaktor ist $k_{\text{zul}} = 0,5$ und als Lüftungsbeiwert $f = 1$ einzusetzen. Die untere Explosionsgrenze bei 20 °C (293 K) liegt für Testbenzin 145/200 bei einer Volumenkonzentration von 0,6 %, die mittlere molare Masse ist 141.

Die Volumenkonzentration in % (Vol.-%) der unteren Explosionsgrenze wird in g/m³ umgerechnet:

$$U = \frac{141}{100 \cdot 0,0241} \cdot 0,6 = 35,1 \text{ g/m}^3.$$

Entsprechend Gleichung (7) ist dann

$$G_{\max} = \frac{24060 \cdot 35,1 \cdot [1 - 0,0014 \cdot (150 - 20)] \cdot 0,5 \cdot 293}{(273 + 150) \cdot 1} = \mathbf{239250 \text{ g/h}}$$

Somit dürfen stündlich maximal 239,25 kg Testbenzin 145/200 in den Durchlauftrockner eingebracht werden.

4.2.3 Beispiel 3:

Berechnung des notwendigen Mindestabluftvolumenstromes (siehe Abschnitt 2.6)

In einer Durchlauftauch- und Trocknungsanlage mit Abdunststrecke sollen Stahlteile beschichtet und getrocknet werden. Der Mindestabluftvolumenstrom ist zu berechnen.

Es werden stündlich 32 kg Lack mit einem Lösemittelmassenanteil von 45 % verarbeitet. Das Trockengut durchläuft nach dem Tauchen eine Abdunststrecke in einer Durchlaufzeit von 20 min. Dabei tropfen stündlich 0,6 kg Lack (Festkörpergewicht) ab. Vom Trockner werden 10 % der in der Abdunststrecke freiwerdenden Lösemittel angesaugt. Die Trocknungstemperatur ist 200 °C.

Die untere Explosionsgrenze des Lösemittels ist nicht bekannt und somit gleich 40 g/m³ zu setzen. Der Sicherheitsfaktor $k_{zul} = 0,5$ und der Lüftungsbeiwert $f = 1$.

Die gesamte stündlich in den Trockner gelangende Lösemittelmenge entspricht damit der in 32 kg Frischlack enthaltenen Lösemittelmenge, vermindert um 90 % der in der Abdunststrecke freiwerdenden Lösemittelmenge. Diese setzt sich zusammen aus dem Vortrocknungsverlust und dem in dem abtropfenden Lack (0,6 kg Festkörpersubstanz) enthaltenen Lösemittel.

Der abtropfende Lack enthält 0,6 kg Festkörper, dem entsprechen bei einem Lösemittelmassenanteil von 45 % im Lack 0,49 kg Lösemittel.

Der abtropfende Lack enthält 0,6 kg Festkörper, dem entsprechen bei einem Lösemittelmassenanteil von 45 % im Lack 0,49 kg Lösemittel. Die abtropfende Lackmenge ist damit 1,09 kg. Auf den Teilen bleiben 30,9 kg Frischlack, der 13,9 kg Lösemittel enthält. In der Abdunststrecke entweichen davon nach Abschnitt 2.12 bei 20minütiger Vortrocknungszeit 45 %; der Vortrocknungsverlust beträgt also 6,25 kg Lösemittel. Von dieser Menge und von dem im abtropfenden Lack enthaltenen Lösemittel werden 10 % vom Trocknerbelüftungssystem angesaugt, das sind

$$10 \cdot \frac{(0,49 + 6,25)}{100} = 0,674 \text{ kg Lösemittel / h.}$$

Diese kommen zusätzlich in den Trockner. Damit ist die gesamte, in den Trockner gelangte Lösemittelmenge

$$G_{max} = (13,90 - 6,25) + 0,674 = 8,32 \text{ kg/h.}$$

Gemäß Gleichung (6) ist

$$\dot{V}_{min, \delta} = \frac{1 \cdot 8320 \cdot (273 + 200) \cdot 1}{40 \cdot [1 - 0,0014 (200 - 20)] \cdot 0,5 \cdot 293} = 898 \text{ m}^3/\text{h}$$

Damit müssen mindestens 900 m³/h bei 200 °C Ablufttemperatur gemessen werden.

Anhang

Vorschriften und Regeln

Nachstehend sind die insbesondere zu beachtenden einschlägigen Vorschriften und Regeln zusammengestellt:

1. Berufsgenossenschaftliche Richtlinien

(Bezugsquelle: Berufsgenossenschaft
oder
Carl Heymanns Verlag KG,
Luxemburger Straße 449, 50939 Köln)

Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit
Beispielsammlung – Explosionsschutz-Richtlinien – (EX-RL) (ZH 1/10),

Richtlinien für Laboratorien (ZH 1/119).

2. DIN-Normen

(Bezugsquelle: Beuth Verlag GmbH,
Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin)

DIN 12 880 Elektrische Laborgeräte; Wärmeschränke;
Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen,
Allgemeine technische Anforderungen.

3. VDE-Bestimmungen

(Bezugsquelle: VDE-Verlag GmbH,
Bismarkstraße 33, 10625 Berlin)

DIN VDE 0165 Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten
Bereichen.