

Frank Stolpe, Lea Schröder, Thomas Mainka

Vergleich von EN 1539 und NFPA 86 mit dem besonderen Schwerpunkt des Explosionsschutzes



ISSN 1868-5838
ISBN 978-3-95606-685-6

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Explosionsschutz

PTB-Ex-17

Braunschweig, März 2022

Frank Stolpe, Lea Schröder, Thomas Mainka

**Vergleich von EN 1539 und NFPA 86
mit dem besonderen Schwerpunkt
des Explosionsschutzes**

ISSN 1868-5838

ISBN 978-3-95606-685-6

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Fachbereich 3.7 „Grundlagen des Explosionsschutzes“

Bericht zu FV 37060

Vergleich von EN 1539 und NFPA 86 mit dem besonderen Schwerpunkt des Explosionsschutzes

F. Stolpe*, L. Schröder[†], T. Mainka[‡]

Stand Februar 2022

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt

[†]Physikalisch-Technische Bundesanstalt / Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

[‡]3M Deutschland GmbH

Abstract

This report summarises a comparison between the European standard EN 1539 and the US standard NFPA 86. It focuses on the safety related demands and especially the measures on explosion protection.

The following aspects are explicitly compared:

- the scope,
- types and classes,
- document structure,
- general safety demands,
- fire protection,
- explosion protection,
- heating,
- control system,
- calculating forced ventilation,
- inertised dryers and ovens,
- information for use.

The NFPA 86 has a serious deficit. It uses data and calculations which do not present the state of the scientific and technical knowledge. Safety characteristic data are used which differ from assessed data from Chemsafe [13]. The correction of the lower explosion level regarding the temperature uses the data published by Zabeta-kis 1965 [14], which is significantly too low as today's knowledge shows.

Both standards have a lot of similarities but also distinct differences. The intersection of both standards allows the description of a dryer or oven which satisfies both standards. On the other hand it is not possible to combine the best of both standards.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	7
1.1	Herausgeber	7
1.2	Historie	7
1.2.1	EN 1539	7
1.2.2	NFPA 86	8
2	Anwendungsbereiche	9
2.1	EN 1539	9
2.2	NFPA 86	10
2.3	Resümee	10
3	Typen und Klassen	11
3.1	EN 1539	11
3.2	NFPA 86	11
3.3	Resümee	12
4	Struktur	13
4.1	EN 1539	13
4.2	NFPA 86	14
4.3	Resümee	15
5	Allgemeine Sicherheitsanforderungen	17
5.1	EN 1539	17
5.2	NFPA 86	17
5.3	Resümee	17
6	Brandschutz	19
6.1	EN 1539	19
6.2	NFPA 86	19
6.3	Resümee	19
7	Explosionsschutz	21
7.1	EN 1539	21
7.2	NFPA 86	23

7.3	Explosionsdruckentlastungen	23
7.3.1	EN 1539	23
7.3.2	NFPA 86	24
7.4	Resümee	25
8	Heizung	27
8.1	EN 1539	27
8.2	NFPA 86	27
8.3	Resümee	27
9	Steuerung	29
9.1	EN 1539	29
9.2	NFPA 86	29
9.3	Resümee	30
10	Lüftungstechnische Berechnungen	31
10.1	EN 1539	31
10.1.1	Durchlauftrockner	31
10.1.2	Kammertrockner	32
10.1.3	Stoff- und Temperaturabhängigkeiten	33
10.2	NFPA 86	34
10.2.1	Durchlauföfen	35
10.2.2	Kammeröfen	35
10.2.3	Korrekturen	35
10.3	Resümee	36
10.4	Beispiele	37
10.4.1	Kammertrockner	37
10.4.2	Durchlauftrockner	38
11	Inertisierte Trockner und Öfen	41
11.1	EN 1539	41
11.2	NFPA 86	41
11.3	Resümee	41
12	Benutzerinformationen	43
12.1	EN 1539	43
12.2	NFPA 86	43
12.3	Resümee	44
13	Zusammenfassung	45
	Quellen und Verweise	47

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit der 3M Deutschland GmbH wurden die Europäische Norm EN 1539 [1] und der US-Standard NFPA 86 [2] miteinander verglichen. Dieser Vergleich konzentriert sich auf die gemeinsame Schnittmenge der Normen ausgehend von der Anwendung und den resultierenden Anforderungen. Die Grundlagen für diesen Vergleich wurden durch L. Schröder [12] erarbeitet.

1.1 Herausgeber

Die NFPA 86 wird durch die „National Fire Protection Association“ herausgegeben und hat daher auch das einleitende Kürzel im Namen erhalten. Die NFPA ist eine non-profit Organisation mit dem Tätigkeitsschwerpunkt Brandschutz. Die NFPA sieht sich selbst als „The authority on fire, electrical, and building safety“. Sie wurde 1896 gegründet und hat ihren Sitz in Quincy, Massachusetts.

Die EN 1539 ist eine durch das Europäische Komitee für Normung (CEN; französisch „Comité Européen de Normalisation“; englisch „European Committee for Standardization“) herausgegebene Norm. CEN ist eine non-profit Organisation mit dem Sitz in Brüssel. Gegründet wurde CEN 1961 von den nationalen Normungsgremien der Mitgliedstaaten von EWG und EFTA. Normen, die durch CEN herausgegeben werden beginnen mit dem Kürzel „EN“. Neben CEN gibt es in der Europäischen Normung noch das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) und Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI).

1.2 Historie

Für ein besseres Verständnis der jeweiligen Norm und ihrer Ziele, ist es sinnvoll einen Blick auf ihre Historie zu werfen. Ursprung und Entwicklung der jeweiligen Norm helfen Gemeinsamkeiten und Unterschiede besser zu verstehen und zu bewerten.

1.2.1 EN 1539

Die erste Ausgabe der EN 1539 erschien im Jahr 2000. Die Ursprünge reichen aber wesentlich weiter zurück. Große Beiträge in der EN 1539 stammen aus den deut-

schen Berufsgenossenschaftlichen Schriften VBG 24 „Lacktrockenöfen“ (ab 1957) bzw. „Trockner für Beschichtungsstoffe“ (seit 1990) und ZH 1/169 „Grundsätze für die Lüftungstechnische Berechnung von Kammertrocknern und Durchlauf Trocknern“ (ab 1990/1992).

1.2.2 NFPA 86

Die Entwicklung der NFPA 86 reicht zurück bis in das Jahr 1926. Die damalige NBFU 34 „Regulations of the Board of Fire Underwriters for Finishing Processes (other than paint spraying) Dip Tanks, Hardening and Tempering Tanks, Flow Coat Work, Japanning and Enameling Including Ovens as Recommended by the National Fire Protection Association“. 1931 wurde dieser Teil in die NBFU 86 „Regulations of the National Board of Fire Underwriters for Ovens For Japan, Enamel, and Other Flammable Finishes as Recommended by the National Fire Protection Association“ ausgegliedert. 1948 wurde die NBFU 86 zur NFPA 86-T „Tentative Standards for Class A Oven Design, Location and Equipment“ umfirmiert und 1950 erstmals als NFPA 86 „Standards for Class A Ovens and Furnace Design, Location and Equipment“ veröffentlicht. 1985 erschien die NFPA 86 erstmalig in ihrer heutigen Struktur. Seitdem durchlief sie mehrere Überarbeitungen. Die derzeit aktuelle Ausgabe stammt aus dem Jahr 2019.

2 Anwendungsbereiche

Für den weiteren Vergleich ist es notwendig zuerst einmal die in den Normen vorgesehenen Anwendungsbereiche darzustellen und einander gegenüber zu stellen.

2.1 EN 1539

Die EN 1539 beschreibt als Norm die Sicherheitsanforderungen an Trockner und Öfen, in denen entzündbare Stoffe freigesetzt werden. Sie stellt eine Typ C-Norm gemäß EN ISO 12100 dar. Sie richtet sich an:

- Maschinenhersteller
- Organisationen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes (Gesetzgeber, Unfallversicherungen, Marktaufsicht)

Sie behandelt die signifikanten Gefährdungen, Gefährdungssituationen und Gefährdungseignisse von Öfen und Trocknern in denen entzündbare Stoffe durch Verdampfen aus und Aushärten von Beschichtungsstoffen freigesetzt werden.

Ausdrücklich ausgeschlossen werden: Öfen und Trockner, in denen entzündbare Stoffe durch Verdampfen aus und Aushärten von Beschichtungsstoffen freigesetzt werden, in denen die Konzentration dieser entzündbaren Stoffe unter keinen Umständen 3 % der unteren Explosionsgrenze (UEG) überschreitet. Bei diesen dürfen die EN 746-1 [6] und die EN 746-2 [7] anstelle der EN 1539 angewendet werden.

Ferner gilt sie nicht für:

- Öfen zum Härten von Metallen;
- Emaillieranlagen;
- ortsbewegliche Heizeinrichtungen zum Trocknen (z.B. Infrarot-Heizstrahler, Heißluft-Gebläse, Fön);
- Lösemittel-Rückgewinnungsanlagen;
- Destillier- und/oder Refraktionsanlagen;
- Textilreinigungsmaschinen.

2.2 NFPA 86

Die NFPA 86 gilt für alle Class A, B, C, D Öfen (siehe Abschnitt 3) und Trockner, thermische Abluftreinigungsanlagen und Thermoprozessanlagen. Sie ist ebenfalls auf Bäckereiöfen anzuwenden.

Sie ist nicht anzuwenden auf:

- Feuerungssysteme mit festen Brennstoffen;
- Aufgeführte Geräte mit einer Heizleistung von weniger als 44 kW;
- Befeuerte Heizeinrichtungen in Raffinerien und petrochemischen Anlagen nach API STD 560, API RP 556, API RP 2001;
- Heizsysteme mit Wärmeträgerflüssigkeiten nach NFPA 87;
- Lichtbogen- und Tauchlichtbogenöfen.

2.3 Resümee

Die NFPA 86 adressiert einen deutlich größeren Anwendungsbereich als die EN 1539. So sind Themen eingeschlossen, die in Europa in Normen außerhalb der EN 1539 behandelt werden. Dies sind unter anderem die Normen der Reihe EN 746 zu Thermoprozessanlagen und Heizsystemen und die EN 12753 [8] zu thermischen Abluftreinigungssystemen.

Der weitere Vergleich wird sich auf die gemeinsame Schnittmenge im Anwendungsbereich beziehen. Diese Schnittmenge wird aus der Tabelle in Abschnitt 3 ersichtlich.

3 Typen und Klassen

Beide Normen unterscheiden verschiedene Trocknertypen nach Bauart und Betriebsweise. Im Einzelnen sind dies die im Folgenden beschriebenen Typen bzw. Classes von Trocknern und Öfen.

3.1 EN 1539

Die EN 1539 unterscheidet zwei grundsätzliche Typen von Trocknern. Diese beiden Typen werden im Abschnitt 3, Begriffe, wie folgt definiert:

“...“

3.5

Trockner Typ A

Trockner, der so konzipiert und gebaut ist, dass die Konzentration brennbarer Stoffe im Gesamtdampfraum unter den in Bild 1 gegebenen Grenzwerten für die höchstzulässige Konzentration an brennbaren Stoffen liegt.

3.6

Trockner Typ B

Trockner, der so konzipiert und gebaut ist, dass die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Gemische durch Begrenzung der Sauerstoffkonzentration in jedem Teil des Gesamtdampfraumes vermieden wird.

...“

Für den Typ A unterscheidet die EN 1539 die Trockner noch nach den Betriebsbereichen 1, 2 und 3. Je nach Betriebsbereich gelten unterschiedliche, von 1 nach 3 zunehmende, Sicherheitsanforderungen.

3.2 NFPA 86

In der NFPA 86 werden die behandelten Trockner und Öfen in Klassen eingeteilt. Es gilt folgende Klasseneinteilung:

Class A: Öfen in denen durch Behandlung oder Freisetzung entzündbarer Stoffe eine potenzielle Brand- oder Explosionsgefahr besteht;

Class B: Öfen in denen keine entzündbaren Stoffe freigesetzt oder behandelt werden;

Class C: Öfen mit spezieller, auch entzündbarer Prozessgasatmosphäre zur Behandlung des Beschickungsgutes;

Class D: Öfen als Druckbehälter in denen die Behandlung teilweise oder vollständig unter Vakuum erfolgt.

3.3 Resümee

Die Beschreibung der Klassen nach NFPA 86 lässt die Annahme zu, dass Trockner nach EN 1539, Typ A und Typ B, denen der Class A nach NFPA 86 vergleichbar sind.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht zu den verwendeten Einteilungen:

EN 1539	NFPA 86
Typ A Typ B	Class A
	Class B Class C Class D

4 Struktur

Die Struktur der Normen bildet sich in erster Linie in ihren Inhaltsverzeichnissen ab. Zum Vergleich sind hier die Hauptüberschriften entsprechend ihrer Reihenfolge aufgeführt.

4.1 EN 1539

Die Reihenfolge der einzelnen Abschnitte wird in einer Europäischen Norm durch die Vorgaben zur Erstellung solcher Normen gegeben.

1. Anwendungsbereich
 2. Normative Verweisungen
 3. Begriffe
 4. Signifikante Gefährdungen
 5. Sicherheitsanforderungen und/oder Schutzmaßnahmen
 6. Überprüfung der Sicherheitsanforderungen und/oder Maßnahmen
 7. Benutzerinformationen
- A Grundsätze für die Lüftungstechnische Berechnung von Kammertrocknern und Durchlauftrocknern
- B Berechnungsbeispiele
- C Konzentrationsmessung in Trocknern
- D Berechnung der unteren Explosionsgrenze bei Trocknungstemperatur
- E Explosionsdruckentlastung
- F Sensoren zur Messung des Volumenstroms
- G Anforderungen an Energieeffizienz und Reduzierung der Umweltbelastung
- H Leitfaden zur Implementierung von Anforderungen von Steuerungen für den Explosionsschutz in Trocknern vom Typ A

4.2 NFPA 86

Die NFPA 86 gliedert sich wie folgt. Die Überschriften der einzelnen Abschnitte wurden sinngemäß ins Deutsche übersetzt.

1. Hinweise zum Gebrauch
 2. Verweise
 3. Definitionen
 4. Allgemeines
 5. Aufstellung und Ausführung
 6. Heizsysteme für Öfen
 7. Inbetriebnahme, Betrieb, Wartung, Prüfung und Abnahme
 8. Schutzeinrichtungen und ihre Anwendung
 9. Brandschutz
 10. Thermische Abluftreinigung
 11. Class A Öfen
 12. Class B Öfen
 13. Besondere Atmosphären bei Class C Öfen
 14. Class D Öfen
- A Ergänzende Erläuterungen
 - B Beispiel einer Betriebs- und Wartungs-Checkliste für Class A Öfen
 - C Beispiel einer Betriebs- und Wartungs-Checkliste für Class A oder Class B Öfen
 - D Untere Explosionsgrenzen und Zündtemperaturen einiger häufiger auftretender Lösemitteldämpfe
 - E Kontinuierliche Messung und Überwachung der Lösemitteldampfkonzentration
 - F Wasserdampfblöschsysteme
 - G Beispiel einer Betriebs- und Wartungs-Checkliste für Class C Öfen
 - H Wartungscheckliste für Vakuümöfen

I Pumpendaten

J Technische Daten

K Symbole der Vakuumtechnik

L Normative Verweise zur Konstruktion

M Informative Verweise

4.3 Resümee

Die Struktur einer europäischen Norm ist durch die Regularien von CEN vorgegeben. Sie adressiert in erster Linie Hersteller. Die NFPA 86 orientiert sich an der möglichen Vorgehensweise des Anlagenplaners oder Betreibers. Für den Vergleich der technischen Anforderungen sind diese Unterschiede in den beiden Normen relevant.

5 Allgemeine Sicherheitsanforderungen

Zu den allgemeinen Sicherheitsanforderungen zählen an dieser Stelle jene, die nicht mit Brand- und Explosionsschutz in Verbindung stehen.

5.1 EN 1539

Es werden Sicherheitsanforderungen gegen mechanische Gefährdungen wie Scheren, Quetschen, Einziehen, Rutschen und Stürzen behandelt. Daneben werden die Anforderungen an eventuell erforderliche Fluchtmöglichkeiten beschrieben.

Es werden die Sicherheitsanforderungen gegen elektrische Gefährdungen behandelt, wie auch jene gegen thermische Gefährdungen, Lärm, Strahlung und gesundheitsgefährdende Stoffe.

In allen Abschnitten und Unterabschnitten wird auf vorhandene europäische Normen zur umfassenderen Ausführung der Anforderungen verwiesen.

5.2 NFPA 86

Sicherheitsanforderungen an Gefährdungen, wie sie zuvor für die EN 1539 dargestellt wurden, werden in der NFPA 86 in der Regel nicht in dedizierten Abschnitten behandelt. Die Sicherheitsanforderungen werden dort formuliert, wo sie relevant werden. Sie werden zumeist nicht mit der ursächlichen Gefährdung in Verbindung gebracht. Oft wird, zum Teil sehr konkret, nur die geforderte Umsetzung beschrieben. Die eigentlich dahinter stehenden Gefährdungen für den Bediener werden nicht behandelt.

Einfache mechanische Gefährdungen für den Bediener werden nicht behandelt.

5.3 Resümee

Beide Normen behandeln den Umgang mit Gefährdungen. Während die EN 1539 dem Prinzip folgt, Gefährdungen, die daraus zu folgernden Sicherheitsanforderungen

5 Allgemeine Sicherheitsanforderungen

gen und deren Umsetzung zu beschreiben, folgt die NFPA 86 dem Prinzip die „best practice“ für deren Umsetzung zu beschreiben.

Tabellarisch zusammengefasst folgt:

	EN 1539	NFPA 86
Gefährdungen durch Scheren, Quetschen, Einziehen Rutschen, Stürzen	5.2.1 5.2.3	— —
Fluchtmöglichkeiten	5.2.2	5.2.6
elektrische Gefährdungen	5.3	4.1.3
thermische Gefährdungen	5.4	5.2.7, 5.2.8
Gefährdungen durch Lärm	5.5	A.1.1
Strahlung	5.6	—
gesundheitsgefährdende Stoffe	5.7	5.1.3.3
Luftmangel (Erstickung)	5.7	5.1.1.3, 5.1.3.3, 11.7

6 Brandschutz

Dem Thema Brandschutz wird in beiden Normen besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

6.1 EN 1539

Die erforderlichen Maßnahmen zum Brandschutz werden in der EN 1539 im Abschnitt 5.8 behandelt. Diese werden in Relation zur jeweiligen Gefährdung betrachtet. Es werden die Anforderungen an die Werkstoffe und Konstruktion beschrieben. Maßnahmen gegen potenzielle Zündquellen durch Heizeinrichtungen, heißen Oberflächen, durch Überhitzung und Selbstentzündung werden beschrieben. Der betriebliche Brandschutz ist zu berücksichtigen.

6.2 NFPA 86

Das Kapitel 9 der NFPA 86 widmet sich dem Brandschutz. Ausgehend von Untersuchung sollen Brandschutzsysteme ausgewählt und installiert werden. Für verschiedene Brandschutzsysteme, ihren Einsatz und ihre Wartung wird auf entsprechende Standards der NFPA verwiesen. Auf Besonderheiten zum Einsatz von Brandschutzsystemen im Kontext der NFPA 86 wird eingegangen.

Die Brandschutzanforderungen an Aufstellungsort und Konstruktion werden in Kapitel 5 beschrieben. In Abschnitt 5.1 werden Anforderungen an den Ort der Aufstellung beschrieben und in Abschnitt 5.2 werden die Brandschutzanforderungen an die Konstruktion gegeben.

6.3 Resümee

Der Brandschutz ist in beiden Normen ein wichtiges Thema. Die EN 1539 konzentriert die Anforderungen an den Brandschutz in einem Abschnitt. In der NFPA 86 dagegen sind die verschiedenen Aspekte des Brandschutzes in verschiedenen Kapiteln zu finden, bis hin zu Anforderungen an Löschsysteme.

Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Punkte zusammen.

	EN 1539	NFPA 86
Allgemeine Anforderungen	5.8.1	9.1, 11.5
Werkstoffe	5.8.2	5.2.2
Konstruktion	dto.	5.2.1
Aufstellungsort	dto.	5.1.3
potenzielle Zündquellen	—	5.2
Heizeinrichtung	5.8.3	—
heiße Oberflächen	5.8.4	—
Überhitzung	5.8.5	—
Selbstentzündung	5.8.6	—
Löschsysteme	—	9.2

7 Explosionsschutz

In beiden Standards hat das Thema Explosionsschutz einen hohen Stellenwert. In der NFPA 86 fokussiert sich das Thema nicht nur auf die Class A Öfen. In der EN 1539 hat der Explosionsschutz einen besonderen Schwerpunkt.

7.1 EN 1539

Die EN 1539 verfolgt beim Explosionsschutz das Grundkonzept der Vermeidung explosionsfähiger Gemische. Dieses Konzept wird sowohl für die Trockner des Typs A (Einhaltung der zulässigen Konzentrationsgrenzen durch technische Lüftung), wie auch für Trockner des Typs B (Begrenzung der Sauerstoffkonzentration durch Inertisierung).

Für den Typ A wird dies durch verschiedene Maßnahmen und deren Kombination erreicht. Ausgangspunkt ist die Festlegung von drei möglichen Betriebsbereichen. Diese Betriebsbereiche sind definiert durch die maximal zulässige Konzentration freigesetzter entzündbarer Stoffe und berücksichtigen die Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze (UEG). Ausgehend von einer Umgebungstemperatur von 20°C sieht Einteilung der Bereiche 1 – 3 wie folgt aus:

Bereich	maximal zulässige Konzentration in % der UEG
1	40
2	60
3	65 (75)

Im Detail gibt es Abweichungen von diesem Ansatz, zum Beispiel bei Annäherung an die Zündtemperatur.

Je nach Betriebsbereich sind eine oder mehrere der folgenden Schutzmaßnahmen gefordert. Dabei gilt die Regel; je höher die maximal zulässige Konzentration sein soll, um so mehr Maßnahmen sind umzusetzen. Für die Bereich 1 ist die Umsetzung einer Maßnahme, für den Bereich 2 sind zwei Maßnahmen und für den Bereich 3 sind drei Maßnahmen erforderlich. Die möglichen Maßnahmen sind:

- Überwachung des Mindestabluftvolumenstromes
- Überwachung der Konzentration

- Regelung des Abluftvolumenstromes
- Überwachung des Eintrags an freisetzbaren entzündbaren Stoffen
- Zündquellenvermeidung durch Geräte und Einrichtungen der Kategorie 3G
- Zündquellenvermeidung durch Geräte und Einrichtungen der Kategorie 2G
- Explosionsdruckentlastung

Nicht jede dieser Maßnahmen ist als alleinige Maßnahme oder als Kombination dieser Maßnahmen sinnvoll. Eine Tabelle gibt die zulässigen Kombinationen vor.

Darüber hinaus gibt es grundlegende Anforderungen, um den Explosionsschutz sicher zu stellen:

- Anforderungen an das Heizsystem
- Anforderungen an den Eintrag entzündbarer Stoffe
- Verriegelung von technischer Lüftung, Heizsystem und Eintrag entzündbarer Stoffe

Ebenso werden technische Anforderungen an den Betrieb formuliert:

- Spülen, Trocknen und Abschalten
- Ausfall der technischen Lüftung, des Heizsystems, des Fördersystems, der sicherheitsrelevanten Steuerung, der Steuerung im Allgemeinen oder der Energieversorgung

Für Trockner des Typs B werden Anforderungen zum Explosionsschutz zunächst nach Durchlauf- und Kammertrocknern differenziert. Anforderungen, die beide Bauweisen erfüllen müssen sind:

- Aufbau der Inertisierung
- Trocknung
- Aufheben der Inertisierung

Dazu werden die jeweils möglichen Störungen betrachtet.

Die Anforderungen an die Überwachung der Sauerstoffkonzentration werden formuliert.

7.2 NFPA 86

In der NFPA 86 gibt es kein Kapitel, welches sich ausdrücklich mit den Anforderungen und Maßnahmen zum Explosionsschutz befasst. Einzig dem Thema Explosionsdruckentlastungen ist ein separater Abschnitt gewidmet (siehe 7.3).

Im Kapitel 11 werden die Class A Öfen behandelt. Dort werden verschiedene Anforderungen an die Eigenschaften der Öfen gestellt, die als Maßnahmen zum Explosionsschutz verstanden werden können.

- technische Lüftung allgemein
- Volumenstromüberwachung
- Begrenzung der Konzentration freigesetzter entzündbarer Stoffe auf 25% der UEG
- Konzentrationsüberwachung (< 25% der UEG ohne Konzentrationsüberwachung , <50% der UEG mit Konzentrationsüberwachung)
- Temperaturbegrenzung gegen Übertemperatur
- Verriegelung von technischer Lüftung, Heizung und Eintrag entzündbarer Stoffe
- Spülen

Anforderungen an inertisierte Öfen werden als Untergruppe der Class A beschrieben. Sie werden im Zusammenwirken mit einer Lösemittelrückgewinnung behandelt. Die technischen Anforderungen für den Aufbau, die Erhaltung und die Aufhebung der Inertisierung werden beschrieben. Die notwendigen Maßnahmen bei Störungen werden gegeben.

7.3 Explosionsdruckentlastungen

Explosionsdruckentlastungen werden in beiden Standards als mögliche Schutzmaßnahme beschrieben, allerdings mit einem unterschiedlichen Stellenwert.

7.3.1 EN 1539

Für Trockner des Typs A, die im Bereich 3 betrieben werden, kann der Einsatz von Explosionsdruckentlastungen eine zulässige Maßnahme des Explosionsschutzes sein. Für die Auslegung der Explosionsdruckentlastungen wird auf die EN 14994 [3]

verwiesen. Die EN 14994 ist nur für Trockner anzuwenden, die einem Explosionsdruck von mindestens 10 kPa und mehr standhalten. Wenn der reduzierte Explosionsdruck 10 kPa nicht überschreiten darf, wird auf die NFPA 68 [4] verwiesen. Dieser Verweis ist nicht normativ und damit die Anwendung nicht verbindlich. Zu den vorwiegend betrieblichen Randbedingungen wird auf die EN 1127 [5] verwiesen.

7.3.2 NFPA 86

In der NFPA 86 werden Explosionsdruckentlastung bereits im Kapitel 5 zu Aufstellung und Konstruktion gefordert. Sie werden gefordert für alle Öfen die mit einem Brennstoff beheizt werden oder in denen entzündbare Flüssigkeiten, Gase oder Stäube behandelt werden. Ausgenommen davon sind Öfen mit folgenden Eigenschaften:

1. Öfen in explosionsbeständiger Bauweise,
2. inertisierte Öfen,
3. thermische Abluftreinigung,
4. Öfen der Class D,
5. bei indirekt beheizten Öfen, in denen unter keinen Umständen eine Konzentration entzündbarer Stoffe von 25% der UEG überschritten wird,
6. direkt beheizte Öfen,
 - bei denen rechnerisch nachgewiesen ist, dass eine Konzentration entzündbarer Stoffe von 25% der UEG bei keinem Betriebszustand überschritten wird,
 - bei denen eine Konzentrationsüberwachung bei Überschreiten einer Konzentration von 10% der UEG für eine Sicherheitsabschaltung sorgt,
 - bei denen eine Konzentrationsüberwachung alle möglicherweise auftretenden entzündbaren Stoffe, auch teilverbrannte Stoffe, erfasst,
 - Messstellen im Verbrennungsraum die Gaslecks und unvollständige Verbrennung erfassen können,
 - bei denen die Konzentrationsüberwachung mindestens jährlich kalibriert wird und die zugehörige Dokumentation vor Ort verfügbar ist,
7. indirekt beheizte Öfen ohne Umluftsystem.

Zur Auslegung der Explosionsdruckentlastungen werden einige einfache Vorgaben gemacht, darüber hinaus wird auf die NFPA 68 [4] verwiesen. Hinweise zur Anordnung der Explosionsdruckentlastungsflächen werden gegeben und durch betriebliche Anforderungen ergänzt.

7.4 Resümee

Der Vergleich der beiden Standards zeigt in diesem Bereich ähnliche Anforderungen und Maßnahmen. Die EN 1539 setzt die Maßnahmenfolge, 1. Vermeidung explosionsfähiger Gemische, 2. Vermeidung wirksamer Zündquellen und 3. Reduzierung der Auswirkungen von Explosionen, konsequent um. In der NFPA 86 wird das Konzept der Zündquellenvermeidung nicht in Betracht gezogen.

Durch die stark unterschiedlichen Strukturen geschieht auch hier die Gegenüberstellung tabellarisch.

	EN 1539	NFPA 86
Volumenstromüberwachung	5.9.2.2.2	11.6.1, 11.6.4
Volumenstromregelung	5.9.2.2.4	—
Konzentrationsbegrenzung	5.9.2	11.5
Konzentrationsüberwachung	5.9.2.3	11.6.8.1, 11.6.9.3.1, 11.6.10
Eintragüberwachung	5.9.2.2.5	—
Zündquellenvermeidung	5.9.2.2.6, 5.9.2.2.7	—
Anforderungen an das Heizsystem	5.9.2.3	11.6.2
Explosionsdruckentlastung	5.2.2.8, Anhang E	5.3, A.5.3
Verriegelung technische Lüftung,	5.9.2.5.5	11.6.4
– Heizsystem,	5.9.2.5.6	11.6.2.4
– Eintrag entzündbarer Stoffe	5.9.2.5.7	11.6.2.3
Spülen	5.9.2.5.2	8.6.1
Inertisierte Trockner	5.9.3	11.7
Inertisierung Aufbau	5.9.3.4	11.7.10
Inertisierung Trocknung	5.9.3.5	11.7.11
Inertisierung Aufhebung	5.9.3.6	11.7.12

Das Thema Explosionsdruckentlastungen ist ein außerhalb diese Vergleichs sehr kontrovers diskutiertes Thema. In der NFPA 86 sind Explosionsdruckentlastungen eine grundsätzliche Anforderung, für die Ausnahmen genannt werden. In der EN 1539 sind Explosionsdruckentlastungen nur den Typ A Trocknern für den Bereich 3 in einigen Konfigurationen vorbehalten, also eher als Ausnahme zu sehen.

8 Heizung

Den Heizsystemen wird in beiden Standards besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Sind sie doch zum einen für den Betrieb notwendig, können sie zum anderen Quellen für Gefährdungen sein.

8.1 EN 1539

Für Heizsysteme, die mit Brennstoff oder Elektrowärme betrieben werden, verweist die EN 1539 auf die EN 746-1 [6] und EN 746-2 [7]. Das Heizsystem ist in die sicherheitsgerichtete Steuerung mit einzubeziehen. Verschiedene Verriegelungen sind gefordert.

8.2 NFPA 86

In der NFPA 86 wird das Thema Heizsysteme wesentlich ausführlicher behandelt. Das Kapitel 6 beschreibt ausführlich die verschiedenen Anforderungen an Heizsysteme und wie diese umzusetzen sind. Der Anhang gibt ergänzende Informationen dazu.

8.3 Resümee

Während sich die NFPA 86 intensiv mit Feuerungs- und Heizsystemen im allgemeinen befasst, wird dies in der EN 1539 nur bezüglich der Trockner Spezifika behandelt. Die allgemeinen Anforderungen an Heizsysteme sind auf die EN 746 [6], [7] verwiesen.

	EN 1539	NFPA 86
Heizsystem, allgemein	5.8.2, 5.9.2.3	6, A.6
Grenztemperatur	5.9.2.3.2	8.16, 8.17, 8.18.2, 8.19
Mindesttemperatur	5.9.2.3.3	—
Verriegelungen	5.9.2.5.5, 5.9.2.5.6, 5.9.2.5.7	11.6.2, 11.6.4

9 Steuerung

In beiden Standards nehmen die Anforderungen an die Steuerung eine wichtige Position ein. Dabei wird zumeist der sicherheitsgerichtete Teil der Steuerung von der Prozesssteuerung unterschieden.

9.1 EN 1539

Steuerungen sind nach ISO 13849-1 [9] zu gestalten und zu konstruieren. Die geforderten Performance Level sind PLd für wirksamsten Funktionen und teilweise PLc für nachgeordnete Sicherheitsfunktionen. In spezifischen Fällen wird eine Risikobewertung zur Festlegung des mindestens erforderlichen PLr gefordert. Die relevanten Unterschiede zwischen Steuerungen für Trockner vom Typ A und Trockner vom Typ B werden dargestellt. In einem Anhang werden Hinweise zur Implementierung einer qualifizierten Steuerung gegeben.

9.2 NFPA 86

Behandelt wird das Thema Steuerung Kapitel 8 über Sicherheitseinrichtungen und deren Anwendung. Die NFPA 86 betrachtet zwei verschiedene sicherheitsgerichtete Steuerungssysteme. Zum einen sind dies die Steuerungen für Brennersysteme und die Steuerung für den Ofen. Im Allgemeinen sind die Steuerungen nach IEC 61508 [10] mit einem Safety Integrity Level von SIL2 oder höher zu realisieren. Sicherheitsgerichtete Steuerung und Prozesssteuerung sind voneinander zu trennen. Sicherheitsgerichtete Steuerungsfunktionen müssen zum Teil fest verdrahtet werden. Die Steuerung ist gegen unbefugte Eingriffe zu schützen. Manuelle Not-Aus Systeme oder kontinuierliche Konzentrationsüberwachungen dürfen nicht durch Steuerungssysteme außer Kraft gesetzt werden. Alle Elemente und Funktionen der Software müssen dokumentiert werden. Die Software muss durch eine andere qualifizierte Person geprüft werden. Der Zugriff auf die Software darf nur durch autorisierte Personen erfolgen.

9.3 Resümee

Beide Standards setzen sich mit dem Thema Steuerungen detailliert auseinander. In der NFPA 86 liegt der Schwerpunkt auf der Steuerung für das Heizsystem mit einigen wenigen übergreifenden Verriegelungen. Für das Niveau der sicherheitsgerichteten Steuerung wird mindestens ein SIL 2 nach IEC 61508 [10] gefordert.

In der EN 1539 werden die Steuerungsaspekte auf die sicherheitsgerichteten Aspekte des gesamten Trockners bezogen, für die Anforderungen an die Heizungssteuerung ist auf die EN 746 [6], [7] verwiesen. Die Auslegung der Steuerung muss auf Basis der ISO 13849-1 [9] auf dem Niveau eines PLd erfolgen.

	EN 1539	NFPA 86
Steuerung, allgemein informativ	5.10 Anhang H	8 A.8

10 Lüftungstechnische Berechnungen

Die Lüftungstechnische Berechnung ist in beiden Standards ein zentrales Element der sicheren Auslegung und des sicheren Betriebs der Trockner und Öfen. Sie betrifft die Trockner und Öfen, die nicht inertisiert betrieben werden.

10.1 EN 1539

Die EN1539 unterscheidet bei der Lüftungstechnischen Berechnung zwischen Durchlauf- und Kammertrocknern. Ziel der jeweiligen Berechnung ist es, die maximal zulässige Konzentration freigesetzter entzündbarer Stoffe einzuhalten. Dabei finden die folgenden Parameter bei beiden Trocknerarten Eingang in die Berechnung und sind dabei gegeneinander abzugleichen:

1. maximal zulässige Konzentration freigesetzter entzündbarer Stoffe C_{zul} in $g \cdot m^{-3}$,
2. maximal einzubringende Menge freisetzbare entzündbarer Stoffe pro Stunde M_{max} in $g \cdot h^{-1}$, bzw. pro Charge M_{max} in g
3. Mindestabluftvolumenstrom $Q_{min,20}$ bei $20^{\circ}C$ in $m^3 \cdot h^{-1}$.

Diese Parameter sind in der Regel auch in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur ϑ zu betrachten.

10.1.1 Durchlauftrockner

Für Durchlauftrockner erfolgt die Berechnung des Mindestabluftvolumenstromes bei $20^{\circ}C$ wie folgt:

$$Q_{min,20} = \frac{M_{max}}{C_{zul}} \quad (10.1)$$

M_{max} ist die maximal zulässige Menge an freisetzbaren entzündbaren Stoffen, die in den Trockner eingebracht werden darf. Bezogen auf die Trocknungstemperatur ϑ in $^{\circ}C$ lautet die Gleichung:

$$Q_{min,\vartheta} = Q_{min,20} \cdot \frac{273 + \vartheta}{293} = \frac{M_{max}}{C_{zul}} \cdot \frac{273 + \vartheta}{293} \quad (10.2)$$

Für den maximalen Durchsatz an freisetzbaren entzündbaren Stoffen gilt:

$$M_{\max} = Q_{\min,20} \cdot C_{\text{zul}} \quad (10.3)$$

oder bezogen auf die Trocknungstemperatur:

$$M_{\max} = \frac{Q_{\min,20} \cdot C_{\text{zul}} \cdot 293}{273 + \vartheta} \quad (10.4)$$

10.1.2 Kammertrockner

Während bei Durchlauftrocknern der Ansatz, was eingebracht wird muss mit der Abluft unter Einhaltung der maximal zulässigen Konzentration auch wieder herausgebracht werden, zum Ziel führt, ist für Kammertrockner ein anderer Ansatz notwendig. Dieser Ansatz beruht auf dem empirischen KLF-Modell [11] für die Trocknung oberflächenbeschichteter Güter.

Die Berechnung folgt den Gleichungen:

$$\gamma = \frac{C_{\text{zul}} \cdot 293 \cdot V}{M_{\max} \cdot (273 + \vartheta)} \quad (10.5)$$

mit V dem Gesamtdampfraum in m^3 und γ dem Verhältnis von höchstzulässiger Konzentration freisetzbarer entzündbarer Stoffe zu der Konzentration, die sich ergeben würde, wenn kein Luftaustausch stattfindet.

Für die Größe γ gilt ferner:

$$\gamma(\tau) = \frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{\ln \tau}{\tau - 1}\right) \quad (10.6)$$

mit

$$\tau = \frac{t_0}{t_w} \quad (10.7)$$

und dem Gültigkeitsintervall $0,01 < \tau < 100$. Dabei ist t_0 die Verdampfungszeit in h bei einer angenommen konstanten Verdampfung der freisetzbaren entzündbaren Stoffe. t_w beschreibt die Zeit in h für einen Luftwechsel im Gesamtdampfraum des Trockners.

$\tau(\gamma)$ wird beschrieben durch:

$$\tau(\gamma) = \frac{a + c \cdot \gamma}{1 + b \cdot \gamma + d \cdot \gamma^2} \quad (10.8)$$

im Gültigkeitintervall $0,01 < \gamma < 0,9$ mit:

$$\begin{aligned} a &= -2946 \\ b &= -3096 \\ c &= 3045 \\ d &= -5222 \end{aligned}$$

Für t_0 gilt:

$$t_0 = \frac{2,58}{\vartheta} \quad (10.9)$$

und ein Luftwechsel im Gesamtdampfraum lässt sich beschreiben durch:

$$t_w = \frac{V}{Q_{\min, \vartheta}} \quad (10.10)$$

und damit

$$Q_{\min, \vartheta} = \frac{V}{t_w} \quad (10.11)$$

Für die maximal in den Trockner einzubringende Menge an freisetzbaren entzündbaren Stoffen folgt:

$$M_{\max} = \frac{C_{\text{zul}} \cdot V \cdot 293}{\gamma \cdot (273 + \vartheta)} \quad (10.12)$$

10.1.3 Stoff- und Temperaturabhängigkeiten

Die zulässigen Konzentrationsgrenzen orientieren sich an der UEG. Sie werden in % der UEG angegeben. Die UEG ist in zweierlei Hinsicht abhängig von der Temperatur:

1. Sie zeigt eine Temperaturabhängigkeit durch die Veränderung der Reaktionskinetik. Diese wird beschrieben durch:

$$\text{UEG}(\vartheta) = \text{UEG}_{20} \cdot (1 - \Delta_{\text{UEG}}(\vartheta - 20)) \quad (10.13)$$

Δ_{UEG} ist die Temperaturabhängigkeit der UEG in %/100K. Dieser Zusammenhang gilt uneingeschränkt, wenn die UEG in Vol% betrachtet wird.

2. Sie unterliegt auch einem physikalischen Einfluss der Art, wenn sie in $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ausgedrückt wird:

$$\text{UEG}(\vartheta) = \frac{\text{UEG}_{20} \cdot 293}{273 + \vartheta} \quad (10.14)$$

Die untere Explosionsgrenze bei Trocknungstemperatur ϑ bezogen auf die Gas-temperatur ϑ_* , errechnet sich zu:

$$\text{UEG}_{\vartheta^*}(\vartheta) = \text{UEG}_{20} \cdot (1 - \Delta_{\text{UEG}} \cdot (\vartheta - 20)) \cdot \frac{293}{273 + \vartheta^*} \quad (10.15)$$

Sind die sicherheitstechnischen Kenngrößen UEG und ihre Temperaturabhängigkeit des freisetzbaren entzündbaren Stoffes nicht bekannt, so soll eine UEG von $40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ mit einer Temperaturabhängigkeit $\Delta_{\text{UEG}} = 0,0020 \text{ K}^{-1} = 20 \text{ \%}/100 \text{ K}$ angenommen werden.

10.2 NFPA 86

Auch in der NFPA 86 wird zur lüftungstechnischen Auslegung der Öfen zwischen Durchlauföfen und Kammeröfen unterschieden. Wie auch bei der EN 1539 ist das Ziel, die Einhaltung der maximal zulässigen Konzentration:

1. Begrenzung der maximal zulässigen Konzentration auf 25 % der UEG.
2. Bei Verwendung einer Konzentrationsüberwachung ist die maximal zulässige Konzentration auf 50 % der UEG zu begrenzen.

Ansatzpunkt für die Berechnung des Abluftvolumenstromes ist das zu erwartende Gasvolumen der freigesetzten entzündbaren Stoffe an der UEG. Die für die Berechnung erforderlichen Werte sind in der Norm für ausgewählte Stoffe tabelliert. Die Berechnung besteht aus drei Schritten:

1. Berechnung des Dampfvolumens je Lösemittelvolumen

$$\frac{\text{Dampfvolumen in m}^3}{\text{Lösemittelvolumen in l}} = \frac{0,998}{1,200} \cdot \frac{\text{SpGr}}{\text{VD}} \quad (10.16)$$

VD : relative Dampfdichte des Lösemitteldampfes (Luft=1,0)

SpGr : spezifische Dichte des Lösemittels (Wasser=1,0)

mit

1 l Wasser = 0,998 kg bei 21°C

trockene Luft bei 21°C und 1013 hPa = 1,200 kg · m⁻³

2. Bestimmung des Dampfvolumens an der UEG

$$\frac{\text{Dampfvolumen(UEG) in m}^3}{\text{Lösemittelvolumen in l}} = \frac{\text{Dampfvolumen in m}^3}{\text{Lösemittelvolumen in l}} \cdot \frac{100}{C_{\text{UEG}}} \quad (10.17)$$

C_{UEG} : UEG des Lösemittels in Vol% korrigiert für die Trocknungstemperatur

3. Bestimmung des Volumen des auf 25% der UEG verdünnten Lösemitteldampf-Luft-Gemisches

$$\frac{\text{Gemisch mit 25\% d.UEG in m}^3}{\text{verdampftes Lösemittelvolumen in l}} = 4 \cdot \frac{\text{Dampfvolumen(UEG) in m}^3}{\text{Lösemittelvolumen in l}} \quad (10.18)$$

Dies lässt sich zusammenfassen als:

$$\frac{\text{Gemisch mit 25\% d.UEG in m}^3}{\text{verdampftes Lösemittelvolumen in l}} = 4 \cdot \frac{0,998}{1,200} \cdot \frac{\text{SpGr}}{\text{VD}} \cdot \frac{100}{C_{\text{UEG}}} \quad (10.19)$$

Werte für die relativen Dichten und relativen Dampfdichten einiger Lösemittel sind in der NFPA 86 in den Tabellen A.11.6.8.4(a) und A.11.6.8.4(b) aufgeführt.

10.2.1 Durchlauföfen

Bei Durchlauföfen beschreibt die NFPA 86 den Mindestabluftvolumenstrom $Q_{\min,S}$ bei Standardbedingungen 21°C, 1013 hPa:

$$Q_{\min,S} = LD_{\text{UEG,zul}} \cdot M_{\max,V} \quad (10.20)$$

Dabei ist $M_{\max,V}$ der maximale Durchsatz an freisetzbaren entzündbaren Stoffen in $l \cdot h^{-1}$ und $LD_{\text{UEG,zul}}$ das Dampfvolumen der zulässigen Menge freisetzbarer entzündbarer Stoffe in $m^3 \cdot l^{-1}$. $Q_{\min,S}$ wird dann in $m^3 \cdot h^{-1}$ ausgedrückt.

Die Volumenströme sind bezüglich der Temperatur und der Höhe über NN zu korrigieren.

10.2.2 Kammeröfen

Der Ausgangspunkt für die Bestimmung des Abluftvolumenstromes bildet bei Kammeröfen die maximal zulässige Konzentration entzündbarer Stoffe im Ofen. Dieser Wert beträgt 25% der UEG ohne Konzentrationsüberwachung und 50% der UEG bei Einsatz einer Konzentrationsüberwachung mit entsprechenden Verriegelungen. Der Abluftvolumenstrom ist dann wie folgt festgelegt:

1. Pro l freigesetzten entzündbaren Stoffes ist eine Abluftvolumenstrom von $3,29 m^3 \cdot \text{min}^{-1} = 197,4 m^3 \cdot h^{-1}$ gefordert:

$$Q_{\min,S} = 3,26 \cdot M_{\max,D} \text{ in } \frac{m^3}{\text{min} \cdot l} \cdot l = m^3 \cdot \text{min}^{-1} \quad (10.21)$$

2. Ist bei dem freigesetzten Lösemittel ein Abluftvolumenstrom $> 19,75 m^3 \cdot l^{-1}$ erforderlich, so ist der Abluftvolumenstrom proportional zu erhöhen, bis dieser Wert erreicht ist.

Da sich der Abluftvolumenstrom auf das Dampfvolumen der freigesetzten entzündbaren Stoffe bezieht, ist dieses zuvor zu berechnen (siehe Durchlauföfen).

10.2.3 Korrekturen

Die NFPA 86 berücksichtigt verschiedene Abhängigkeiten durch Temperatur und Ort für die Auslegung der Öfen.

Temperaturkorrektur

Der berechnete Abluftvolumenstrom ist um die physikalische Volumenänderung bei Temperaturänderung zu korrigieren. Neben der Gleichung,

$$\text{korr}_\vartheta = \frac{\vartheta + 273}{21 + 273} \quad \text{mit } \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (10.22)$$

sind die Korrekturfaktoren für einen Temperaturbereich von 21°C bis 760°C tabelliert.

Höhe über N.N.

Der berechnete Abluftvolumenstrom soll entsprechend der Höhe über dem Meeresspiegel des Betriebsortes korrigiert werden. Für Betriebsorte unter 305 m ü.N.N. ist keine Korrektur gefordert. Die Werte für diese Korrektur sind tabelliert. Sie leiten sich aus der barometrischen Höhenformel ab, siehe [12].

Untere Explosionsgrenze

Bei der Temperaturkorrektur der UEG wird zwischen Durchlauf- und Kammeröfen unterschieden.

Für Durchlauföfen soll die Temperaturkorrektur der UEG wie folgt erfolgen:

$$UEG_{\vartheta^*}(\vartheta) = UEG_{25} \cdot (1 - 0,000784 \cdot (\vartheta - 25)) \quad (10.23)$$

Die Bezugstemperatur ist in diesem Fall 25°C

Bei Kammeröfen wird die Auswirkung der Temperaturabhängigkeit der UEG im Temperaturbereich von 121°C bis 260°C durch einen Zuschlag zum Abluftvolumenstrom um den Faktor 1,4 dargestellt. Für Temperaturen über 260°C ist der Korrekturfaktor durch Versuche zu ermitteln.

10.3 Resümee

Sowohl in der EN 1539 wie auch in der NFPA 86 wird für die lüftungstechnische Berechnung der Ansatz verfolgt, die maximale Lösemittelkonzentration im Trockner und in der Abluft auf ein sicheres Maß zu begrenzen. Physikalisch-chemische Einflüsse werden in beiden Fällen berücksichtigt. In der EN 1539 wird für Kammertrockner ein empirisches Modell für die Trocknung oberflächenbeschichteter Güter vorgeschlagen. Die NFPA 86 stellt sich hier breiter und allgemeiner auf, setzt aber auf eine deutlich größere Sicherheitsmarge. Wie in den folgenden Beispielen bereits deutlich wird, unterscheiden sich die Ergebnisse der Berechnungsgänge zu Teil erheblich.

Als besonders problematisch sei hier der Ansatz der NFPA 86 zur Berechnung der Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze genannt. Hier wird auf eine deutlich veraltete Abhängigkeit zurück gegriffen. Der gegenwärtige Kenntnisstand legt hier einen deutlich höheren Wert nahe, 20%/100 K (EN 1539) gegenüber 7,8%/100 K (NFPA 86).

10.4 Beispiele

Um die jeweiligen lüftungstechnischen Berechnungen zu illustrieren, seien die folgenden Beispiele aufgeführt. Diese stammen aus der Masterarbeit von L. Schröder [12]. Dort sind auch weitere Beispiele zu finden.

Beispielhaft sollen hier die beiden grundlegenden Trocknervarianten Kammer- und Durchlauftrockner betrachtet werden.

10.4.1 Kammertrockner

Für einen Kammertrockner soll die maximal zulässige Beladung berechnet werden. Der Trockner ist wie folgt beschrieben:

1. Gesamtdampfraum $V = 2,447 \text{ m}^3$
2. maximale Trocknungstemperatur $\vartheta = 260^\circ\text{C}$
3. Mindestabluftvolumenstrom $Q_{\min,\vartheta} = 360 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
4. Betriebsbereich 1 nach EN 1539 ($C_{\text{UEGzul}} = 40\%$ der UEG)
5. freigesetzter entzündbarer Stoff nicht näher bekannt, d.h. $\text{UEG}_{20} = 40 \text{ g} \cdot \text{m}^3$ und $\Delta_{\text{UEG}} = 20\%/100 \text{ K}$

Berechnung nach EN 1539

1. Berechne t_0 nach Gleichung 10.9:

$$t_0 = \frac{2,58}{260} = 0,0099 \text{ h} \quad (10.24)$$

2. Berechne t_w nach Gleichung 10.10:

$$t_w = \frac{2,447}{360} = 0,0068 \text{ h} \quad (10.25)$$

3. Damit folgt für τ nach Gleichung 10.7:

$$\tau = \frac{0,0099}{0,0068} = 1,4559 \quad (10.26)$$

4. Damit folgt für $\gamma(\tau)$ (Gleichung 10.6):

$$\gamma = \frac{1}{1,4559} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 1,4559}{1,4559 - 1}\right) = 0,3013 \quad (10.27)$$

5. Für die untere Explosionsgrenze bei Trocknungstemperatur folgt:

$$UEG(\vartheta) = 40 \cdot (1 - 0,002 \cdot (260 - 20)) = 20,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (10.28)$$

6. Für die maximale zulässige Konzentration C_{zul} folgt:

$$C_{zul} = \frac{40 \cdot 20,8}{100} = 8,32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (10.29)$$

7. Für die maximal in den Trockner einzubringende Menge freisetzbarer entzündbarer Stoffe folgt:

$$M_{max} = \frac{8,32 \cdot 293 \cdot 2,447}{(273 + 260) \cdot 0,3013} = 37,15 \text{ g} \quad (10.30)$$

Berechnung nach NFPA 86

1. Korrektur des Abluftvolumenstroms für 21°C:

$$Q_{min,S} = 360 \cdot \frac{21 + 273}{260 + 273} = 198,5741 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (10.31)$$

2. Aus dem Abluftvolumenstrom folgt nach Gleichung 10.21 für die maximale Beladung an der UEG:

$$M_{max,D} = Q_{min,S} = \frac{198,5741}{3,26 \cdot 1,4} = 0,71851 \quad (10.32)$$

Eingeschlossen ist der Faktor für die Korrektur der UEG.

3. Zur Berechnung der Masse wird Toluol (Dichte $\rho = 0,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) als repräsentatives Lösemittel herangezogen. Zur Einhaltung der maximal zulässigen Konzentration von 25% der UEG ist nur ein Viertel dieser Masse zulässig:

$$M_{max,D} = 625,1 \text{ g} \cdot \frac{1}{4} = 156,3 \text{ g} \quad (10.33)$$

10.4.2 Durchlauftrockner

Die Berechnung des Mindestabluftvolumenstromes soll am Beispiel eines Durchlauftrockners erfolgen. Die folgenden Eigenschaften werden für die Berechnungen zugrunde gelegt:

1. Freigesetzter entzündbarer Stoff: Toluol

$$UEG_{20} = 38 \text{ g} \cdot \text{m}^3 = 1,1 \text{ Vol\%}$$

$$\Delta_{UEG} = 16\%/100 \text{ K}$$

$$\text{Dichte } \rho = 0,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

2. Durchsatz: $M_{\max} = 11 \cdot \text{h}^{-1} \hat{=} 870 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$
3. maximale Trocknungstemperatur $\vartheta = 149^\circ\text{C}$
4. maximal zulässige Konzentration entzündbarer Stoffe $C_{\text{zul}} = 25\%$ der UEG (nach NFPA 86), entspricht Betriebsbereich 1 (nach EN 1539).

Berechnung nach EN 1539

1. Berechnung der UEG bei Trocknungstemperatur:

$$UEG_{\vartheta} = 38 \cdot (1 - 0,0016 \cdot (149 - 20)) \cdot \frac{293}{273 + 149} = 20,9 \text{ g} \cdot \text{m}^3 \quad (10.34)$$

2. Berechnung der maximal zulässigen Konzentration:

$$C_{\text{zul}} = \frac{25}{100} \cdot 20,9 = 5,23 \text{ g} \cdot \text{m}^3 \quad (10.35)$$

3. Bezogen auf 20°C beträgt der damit der Mindestabluftvolumenstrom:

$$Q_{\min,20} = \frac{870}{5,23} = 166,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (10.36)$$

4. Für den Mindestabluftvolumenstrom bei Trocknungstemperatur folgt dann:

$$Q_{\min,\vartheta} = 166,2 \cdot \frac{273 + 149}{293} = 239,37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (10.37)$$

Berechnung nach NFPA 86

1. Berechnung der unteren Explosionsgrenze bei Trocknungstemperatur:

$$UEG_{\vartheta} = 1,1 \cdot (1 - 0,000784 \cdot (149 - 25)) = 0,993 \text{ Vol}\% \quad (10.38)$$

2. Berechnung des Lösemitteldampfvolumens:

$$LD = \frac{0,998}{1,200} \cdot \frac{0,87}{3,1} = 0,2334 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1} \quad (10.39)$$

3. Lösemittelmenge für 25% der UEG:

$$LD_{UEG} = 0,2334 \cdot \frac{100 - 0,9931}{0,9931} \cdot 4 = 93,0752 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1} \quad (10.40)$$

4. Für den Mindestabluftvolumenstrom folgt damit:

$$Q_{\min,20} = 93,0752 \cdot 1,0 = 93,0752 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (10.41)$$

Bei Trocknungstemperatur sind dies:

$$Q_{\min,\vartheta} = 93,0752 \cdot \frac{273 + 149}{293} = 133,60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (10.42)$$

11 Inertisierte Trockner und Öfen

Beiden Normen behandeln Trockner mit einer inerten Atmosphäre in ihrem Inneren (Gesamtdampfraum).

11.1 EN 1539

Die EN 1539 bezeichnet Trockner mit einer inerten Atmosphäre im Gesamtdampfraum als Typ B Trockner. Es werden sowohl allgemeine Anforderungen sowie spezielle Anforderungen an Durchlauf- bzw. Kammetrockner beschrieben. Die Anforderungen zu Aufbau, Erhalt und Abbau der Inertisierung werden beschrieben, sowie der Umgang mit Störungen.

11.2 NFPA 86

In der NFPA 86 werden inertisierte Öfen im Kontext mit einer Lösemittelrückgewinnung behandelt. Sie werden als "Low-Oxygen Class A Ovens with Solvent Recovery" bezeichnet. Die Anforderungen an die Gestaltung des Ofens und an den Betrieb werden hauptsächlich für die Inertisierung beschrieben, die Lösemittelrückgewinnung wird nur sehr allgemein behandelt.

11.3 Resümee

In beiden Normen werden Trockner mit einer inerten Atmosphäre behandelt. Während die NFPA 86 dies explizit im Zusammenwirken mit einer Lösemittelrückgewinnung sieht, sind in der EN 1539 Lösemittelrückgewinnungsanlagen ausdrücklich nicht in den Anwendungsbereich eingeschlossen.

Es werden grundlegende Anforderungen ebenso beschrieben wie Anforderungen an den sicheren Betrieb und den Umgang mit Störungen.

Die nachstehende Tabelle fasst die zusammen:

11 Inertisierte Trockner und Öfen

	EN 1539	NFPA 86
Allgemeines	5.9.3.1	11.7.1
Anlagenanforderungen	5.9.3.3 5.9.3.3	11.7.3 11.7.4
Inertisierung, - Aufbau	5.9.3.4	11.7.10
- Betrieb	5.9.3.5	11.7.11
- Abbau	5.9.3.6	11.7.12
Überwachung den Sauerstoffkonzentration	5.9.3.7	11.7.9
Störungen	5.9.3.4.3 5.9.3.5.3 5.9.3.5.4 5.9.3.6.2	11.7.13

12 Benutzerinformationen

Die für die Aufstellung und den Betrieb notwendigen Informationen werden in beiden Standards beschrieben.

12.1 EN 1539

Die EN 1539 folgt in ihrem Aufbau den Vorgaben von CEN. Die Anforderungen zu den Benutzerinformationen werden in einem eigenen Abschnitt, dem Abschnitt 7, beschrieben. Die Anforderungen gliedern sich in fünf Unterabschnitte mit besonderen Schwerpunkten:

1. Allgemeiner Teil
2. Angaben zur Installation
3. Angaben zum Betrieb
4. Angaben zur Instandhaltung
5. Kennzeichnung

In jedem dieser Abschnitte werden die erforderlichen Informationen aufgeführt, die dem Benutzer durch den Hersteller zur Verfügung zu stellen sind. Dabei werden auch Anforderungen beschrieben, die an den Aufstellungsort zu stellen sind aber auch für Demontage und Transport.

12.2 NFPA 86

Im Abschnitt 4 werden die mit grundlegenden Anforderungen verbundenen Dokumentationspflichten aufgeführt. Diese sind:

1. Genehmigungen, Pläne und Spezifikationen
2. Elektroinstallationen
3. Sicherheitskennzeichnung und Typenschild
4. Druckgefäße und Wärmetauscher

Im Anhang A.4.1 werden die im Abschnitt 4 geforderten Dokumentationen zum Teil noch einmal konkretisiert.

Im Abschnitt 7.3 werden die Anforderungen zum Betrieb beschrieben und eine Betriebsanleitung gefordert.

12.3 Resümee

Beide Standards stellen Anforderungen an die für den Betreiber notwendige Dokumentation. Die EN 1539 fasst diese Anforderungen in einem eigenen Abschnitt zusammen. Während sich in der NFPA 86 mindestens drei verschiedene Abschnitte unter verschiedenen Aspekten mit den Anforderungen an die Dokumentation befassen. Die NFPA 86 erwähnt auch ausdrücklich erforderliche Genehmigungsunterlagen.

13 Zusammenfassung

Beide Normen weisen viele Gemeinsamkeiten aber auch deutliche Unterschiede auf. Die betrachteten Aspekte werden in beiden Normen in unterschiedlicher Tiefe mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung behandelt. Die Schnittmenge aus beiden Normen erlaubt es einen Trockner zu beschreiben, der beiden Standards gerecht wird. Dieser Kompromiss lässt sich als ein Trockner nach EN 1539 mit einem $C_{\max} = 25\%$ d.UEG bzw. mit einer Konzentrationsüberwachung $C_{\max} = 50\%$ d.UEG. Die maximale Oberflächentemperatur wäre auf 71°C zu beschränken. Das Sicherheitsniveau der Steuerung muss das höhere des durch die beiden Normen geforderten Sicherheitsniveau erfüllen. Der Trockner wäre mit Explosionsdruckentlastungen auszurüsten. Trotzdem führt dies nicht zu den gleichen Betriebsbedingungen. Der zu fordernde Abluftvolumenstrom bzw. die maximal einzubringende Menge entzündbarer Stoffe sind immer noch verschieden. Allerdings lässt die NFPA 86 die Anwendung anderer Systeme, Methoden oder Geräte zu, die eine äquivalente oder höherwertige Qualität, Festigkeit, Feuerbeständigkeit, Effizienz, Stabilität oder Sicherheit gewährleisten (Abschnitt 1.5). Das bedeutet, dass ein Abweichen von den Vorgaben der NFPA 86 erlaubt ist, wenn das beschriebene Sicherheitsniveau eingehalten oder übertroffen wird.

Beide Normen behandeln inertisierte Trockner und geben eine präzise Beschreibung zu Aufbau und Betrieb. Hier ist es denkbar einen Trockner zu bauen, der beiden Welten gerecht wird. Eine integrierte Lösemittelrückgewinnung wäre nicht durch die EN 1539 abgedeckt.

Ein zuerst angedachter messtechnischer Vergleich eines Class A Trockners nach NFPA 86 mit einem Trockner nach EN 1539 erwies sich als nicht praktikabel. In Deutschland gibt es keine bekannten Trockner die nach NFPA 86 gebaut und betrieben werden (die Verfügbarkeit der EN 1539 schließt dies aus). Labortrockner die nach NFPA 86 gebaut werden, müssen diese aber nicht vollumfänglich erfüllen, da ihre Heizleistung/Anschlussleistung unter 44 kW (NFPA 86, 1.1.7) liegt. Die bei einem solchen Trockner bestehenden Abweichungen zur NFPA 86 sind nicht transparent.

Ein Manko der NFPA 86 ist die Anwendung von Daten und Berechnungen, die nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. So gibt es in den Stofftabellen Daten, die von den bewerteten Kenngrößen aus Chemsafe [13] abweichen. Die Korrektur der UEG bezüglich der Temperatur erfolgt mit einem Faktor, der auf eine Veröffentlichung aus dem Jahre 1965 (M.G. Zabetakis [14]) zurück geht. Inzwischen verfügbare Daten zeigen klar, dass der damals beschriebene Wert als

deutlich zu klein anzusehen ist. Hier ist ein erhöhtes Gefahrenpotenzial zu sehen.

Als Fazit lässt sich zusammenfassen, ein Trockner, der beiden Standards gerecht wird, ist denkbar. Ein Trockner, der das Beste aus beiden Welten zusammenführt, ist nicht möglich.

Quellen und Verweise

- [1] Europäische Norm DIN EN 1539:2016-02; Trockner und Öfen, in denen brennbare Stoffe freigesetzt werden - Sicherheitsanforderungen; Deutsche Fassung EN 1539:2015, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag 2016
- [2] NFPA 86 Standard for Ovens and Furnaces, 2019 Edition, National Fire Protection Association
- [3] Europäische Norm EN 14994; Schutzsysteme zur Druckentlastung von Gasexplosionen, CEN
- [4] NFPA 68 Standard on explosion protection by deflagration venting, National Fire Protection Association
- [5] Europäische Norm EN 1127; Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik; CEN
- [6] Europäische Norm EN 746-1; Industrielle Thermoprozessanlagen - Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen an industrielle Thermoprozessanlagen; CEN
- [7] Europäische Norm EN 746-2; Industrielle Thermoprozessanlagen - Teil 2: Sicherheitsanforderungen an Feuerungen und Brennstoffführungssysteme; CEN
- [8] Europäische Norm EN 12753; Thermische Reinigungssysteme für Abluft aus Anlagen zur Oberflächenbehandlung - Sicherheitsanforderungen; CEN
- [9] Internationale Norm ISO 13849-1; Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze; ISO
- [10] Internationale Norm IEC 61508-1; Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [11] F. Stolpe, H. Förster; Untersuchung zur Bildung explosionsfähiger Gemische in Trocknern für Beschichtungsstoffe, Fortschritt-Berichte VDI, VDI-Verlag, 2004
- [12] L. Schröder; Vergleich des Europäischen und des US-Standards zu Trocknern und Öfen mit dem besonderen Schwerpunkt der Sicherheitsanforderung; Masterarbeit, Otto von Guericke Universität Magdeburg, 2020

- [13] Datenbank bewerteter sicherheitstechnischer Kenngrößen chemsafe
<https://www.chemsafe.ptb.de/>
- [14] M.G. Zabetakis, Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapours, Bulletin 627, Bureau of Mines, 1965



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de

Vertrieb:

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen

Telefon: (04 21) 369 03-0
Fax: (04 21) 369 03-63
www.schuenemann-verlag.de