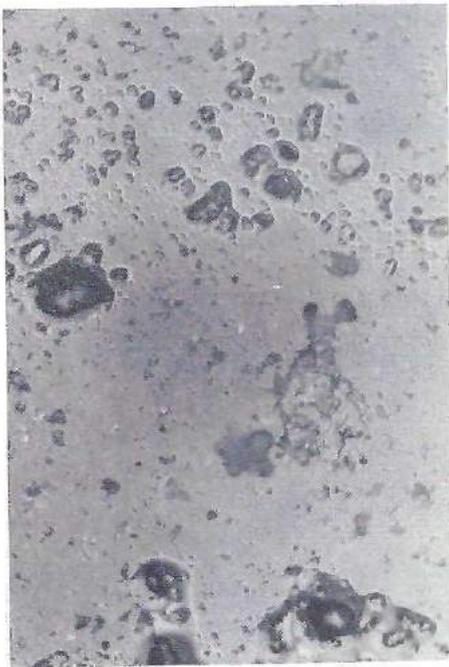


Entkeimende Be- und Entlüftungssysteme

Ulrich Verhoefen, Leiter Technik
ultrafilter gmbh Düsseldorf

Insbesondere in der Nahrungs- und Genussmittelindustrie ist die Problematik um die Lagerung von Produkten und Rohstoffen auf steriler Basis bekannt. In der Umweltflut befinden sich Millionen von Schwebstoffen und anderen Verunreinigungen, Keime, Bakterien, Bakteriophagen und Viren. Gerade diese Kontaminanten finden in der Nahrungsmittelindustrie „Schlaraffenland“-ähnliche Bedingungen, die zu einer schnellen Vermehrung der Zellen und zum Verderbnis des Produkts führen.



Öl, Wasser, Schmutz sowie diverse Mikroorganismen.

Außenluft enthält unter normalen Umständen 100 bis 500 Keime pro m³ (Abb. 1). In Arbeitsräumen, auch in klimatisierten, werden Belastungen von 1000 bis 5000 Keimen/m³ gemessen. Hieraus resultiert ein verstärktes Interesse, das gelagerte Produkt, z. B. Bier, vor Infektionen von außen zu schützen. In unserem Fall ist dies durch entkeimende Filteranlagen, die eine sterile Belüftung des Lagertanks ermöglichen, gegeben. Aber nicht nur das Produkt, in vielen

Fällen sollte auch die Umgebung vor einer Kontamination mit Fremdstoffen geschützt werden. Es geht also einmal um die sterile Belüftung des Tanks und darüber hinaus um die sterile Entlüftung eines Systems.

Je nach Art des gelagerten Produktes und je nach Verwendungszweck innerhalb der Produktion sind unterschiedliche

Anforderungen an die Reinheit des Produkts und seiner Umgebung zu stellen. (Tab. 1).

Je höher die Anforderungen, desto qualitativ höherwertig muß die Belüftungsanlage sein – bis hin zur 100%igen Sterilität.

Für die unterschiedlichen Applikationen wurden z. B. von der Firma ultrafilter drei Bauarten von Be- und Entlüftungssystemen entwickelt, mit denen alle Anwendungsgebiete abgedeckt werden können.

Tab. 1
Der Grad der mikrobiologischen Reinheit bei pharmazeutischen Präparaten (nach dem Entwurf zur Pharm. Eur. vom Mai 1979).

Kategorie	Produkte	Vorgeschlagene Grenzwerte
1	Injektionspräparate, Ophthalmische Präparate. Präparate zur Anwendung in verschiedenen Körperhöhlen, bei denen die Einbringung von Mikroorganismen gefährlich wäre. Andere Präparate mit der Deklaration steril, für tiefe Wunden und schwere Verbrennungen	Erfüllen die Bedingungen des Sterilitätstests der Pharm. Eur. - steril
2	Präparate zur topischen oder sonstigen lokalen Anwendung, die nicht steril sein müssen. (Dermatika incl. Puder, Ohren- und Nasenpräparate, vaginalpräparate).	Gesamtkeimzahl $\leq 10^2$ /g oder ml an aeroben Mikroorganismen, dabei jedoch Abwesenheit von - Enterobakterien - Pseudomonas aeruginosa - Staph. aureus
3	Oral-Präparate (fest und flüssig)	Gesamtkeimzahl $\leq 10^3$ bzw. $\leq 10^4$ * pro g oder ml an aeroben Bakterien und $\leq 10^2$ Hefen und Schimmelpilze pro g oder ml. - $\leq 10^2$ Enterobakterien pro g oder ml. - Abwesenheit von E. coli in 1 ml oder 1 g. - Abwesenheit von Salmonellen in 10 ml oder 10 g.

Anforderungsprofil an die Filter

Steril gelagert werden unterschiedlichste Produkte und Rohstoffe unter meist differenzierten Umständen. Hier stellt sich die Frage, welche Anforderungen werden an eine solche Filteranlage gestellt:

1. Sterilität
2. Das Filterelement muß **beidseitig** durchströmbar sein.
 - beim Befüllen wird Luft aus dem Tank gedrängt.
 - beim Entleeren wird Luft angesaugt.
3. Das Filter muß **sterilisierbar** sein.
 - Eine sterile Lagerung bedingt immer eine anlagenspezifische Desinfizierung der kompletten Installation, bestehend aus Rohrleitungen, Ventilen, Armaturen, Filtern, Behältern etc.
4. Ein **geringer Filterwiderstand** ist erforderlich.
 - Lagertanks werden üblicherweise in Leichtbauweise ausgeführt.
 - Geringe Über- und Unterdrücke lassen die Tanks leicht deformieren.

Je nach Anwendungsfall und Anlagentyp sind die Punkte 1 bis 4 unterschiedlich stark zu berücksichtigen. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten der sterilen Be- und Entlüftung:

Zwangselüftung – hier erfolgt der Druckausgleich durch zugeführte Energie.

Selbstbelüftung – hier erfolgt der Druckausgleich durch systemeigenen Aufbau eines statischen Druckes mit anschließender „Atmung“.

Kontaminationsproblematik

Kritische Zeiten, Zeiten in denen Sekundärinfektionen möglich sind, bedingen besondere Aufmerksamkeit:

1. Befüllen des Tanks

Der Tank wird mit einer unsterilen Verbindung mit dem Füllsystem verbunden. Kontaminanten werden über die Verbindungsstücke oder durch das Produkt in den Tank eingeschleppt.

2. Entleerung des Tanks

Hier gilt sinngemäß Punkt 1.

3. Bedämpfung

Durch unzureichende Desinfektion werden nicht alle Keime abgetötet.

4. Abkühlung

Durch unsachgemäße Abkühlung bzw. Trocknung können Keime in das Sterilsystem gelangen.

5. Lagerung

Bei längerer Lagerung können über Verbindungsstücke, Ventile oder Meßsysteme ohne weiteres Mikroorganismen in das System gelangen.

Auf ein Durchwachsen des Sterilfilters muß geachtet werden, weil:

durch rückwärtiges Wachsen von unproblematischen Kontaminanten des Sterilsystems und durch rückwärtiges Verteilen von Aromaten oder dampfförmigen Bestandteilen der Produkte (oder ähnlichen Zuständen) Nährboden in das Sterilfilter getragen wird.

Unter bestimmten Voraussetzungen ist damit ein Durchwachsen des Sterilfiltermediums unumgänglich.

In diesen Fällen muß den Erfordernissen der Anlage und den vorliegenden Erfahrungen entsprechend das Sterilfilter desinfiziert werden, unabhängig von der Anlage.

sagt, mit den mehr oder weniger stark geforderten Sicherheiten und beginnen wir mit dem höchsten Stand der Anforderung.

1. Zwangselüftung (Abb. 2)

Wird für alle Zustände und Betriebspunkte Sterilität verlangt, wählt man immer eine Zwangselüftung, mit der man jedes Risiko ausschaltet. Die Belüftung erfolgt hierbei durch steril gefilterte komprimierte Luft oder Gebläseluft. Der Vor- und Rückdruck wird auf ein Minimum reduziert. Die Entlüftung erfolgt durch ein BE-Filter in in-line sterilisierbarer Ausführung.

Bei dieser Verfahrensweise erfolgt eine permanente Durchströmung des Tanks. Ein ganz leichter Überdruck sorgt für die Entlüftung über das Abluftfilter. Eine Entnahme bzw. Befüllung kann jederzeit erfolgen, ohne daß ein höherer Unter- oder Überdruck entstehen kann.

Die Sterilisation kann durch Dampf erfolgen, Zuluft- und Abluftfilter werden mit der gesamten Anlage sterilisiert.

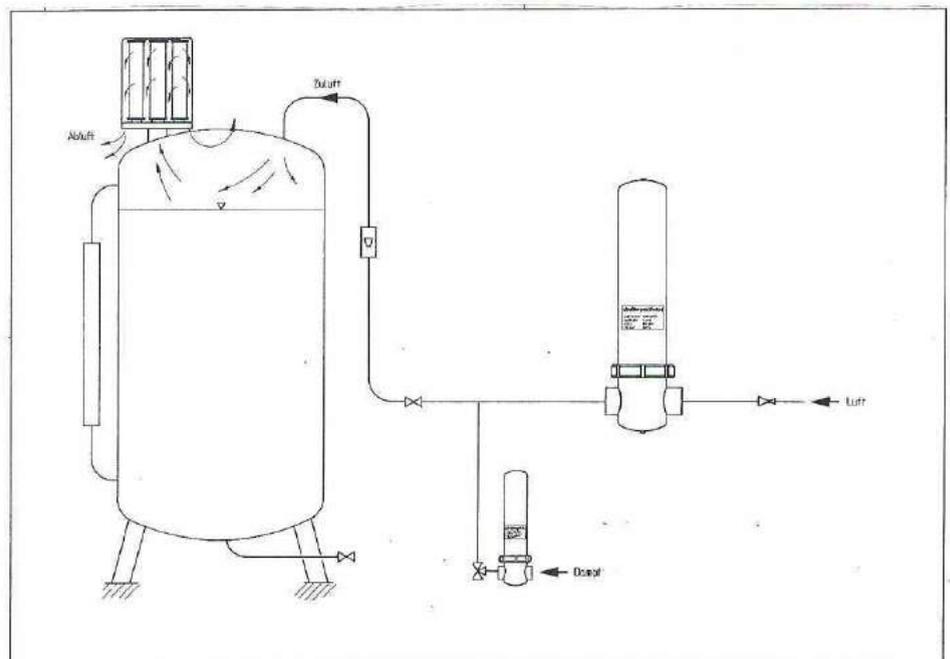
Alle Armaturen und Ventile müssen absolute Dichtigkeit aufweisen und sterilisierbar sein.

Insbesondere in biologischen, medizinischen, chemischen und pharmazeutischen Applikationen werden heute Systeme ausgewählt unter dem Sicherheitsaspekt: Schutz der eigenen Produktion und Schutz der Außenluft vor Kontamination mit gefährlichen Mikroorganismen. Systeme nach Anwendungsschema 1 werden hier vorgezogen.

Be- und Entlüftungssysteme

Befassen wir uns chronologisch mit den einzelnen mehr oder weniger stark geforderten Reinheitsansprüchen, besser ge-

Abb. 2: Zwangselüftetes Tanksystem mit Sterilfilter auf Zu- und Abluftseite.



2. Eigenbelüftung durch in-line sterilisierbare BE-Filter (Abb. 3)

Kommen wir zurück auf die in der Einleitung aufgeführten kritischen Zeiten für Sekundärinfektionen; hier müssen wir bei der Selbstbelüftung insbesondere die Gefahrenquelle 3 und 4 berücksichtigen.

In allen Fällen, wo keine – unabhängig von den Betriebsverhältnissen – absolute Keimfreiheit garantiert sein muß, spricht man von relativer Keimfreiheit. In der Industrie liegen hier die meisten Anwendungsfälle. In Abhängigkeit von der Prozeßführung sind wenige Keime im System unproblematisch.

Wie wir wissen, ist das Wort „steril“ grundsätzlich umstritten. Fachkreise gehen davon aus, daß der Nachweis von Keimen nur eine Frage der Prüfmenge ist. In der Tat ist in den meisten Fällen entscheidend, daß das Keimwachstum kontrollierbar sein muß.

Das heißt, es darf nur eine maximale Keimbelastung in einer definierten Zeiteinheit im Produkt oder im Rohstoff vorkommen. Je höherwertiger das Produkt, desto weniger Keime dürfen absolut nachgewiesen werden.



Abb. 3
BE-Filter in in-line sterilisierbarer Ausführung, das Filterelement wird fest im Gehäuse fixiert.

Darüber hinaus bieten einige Produkte einen gewissen Eigenschutz bzw. Immunität gegen viele Bakterien.

Ist diese maximale Keimbelastung erreicht, z. B. durch eingeschleppte Infektionen von Produkten, Ventilen, Rohrleitungen, muß die gesamte Anlage desinfiziert werden.

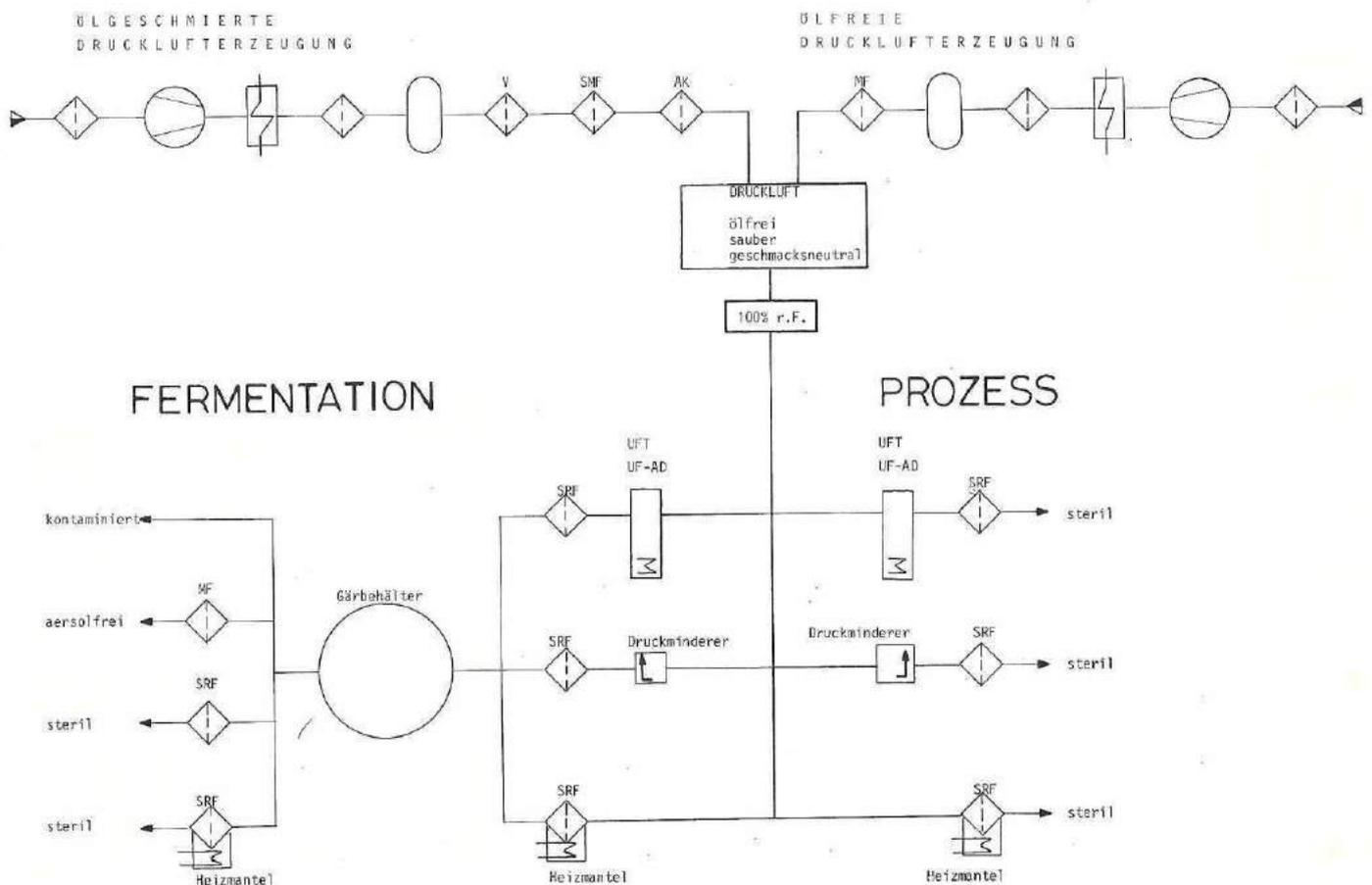
Alle Applikationen, die unter diesem Aspekt zu betrachten sind, werden mit sogenannten in-line sterilisierbaren BE-Filtern ausgerüstet.

Die Belüftung beim Entleeren oder die Entlüftung beim Füllen, der Druckausgleich bei Temperaturschwankungen (Temperaturdifferenz Produkt/Tank, Umgebung/Tank, Temperaturschwankungen Tag/Nacht) und die Belüftung des Tankinhaltes als solches erfolgt durch ein am obersten Punkt des Behälters installiertes sterilfilterndes „entkeimendes Atmungsfilter“.

Das Gehäuse aus Edelstahl ist so ausgeführt, daß das Sterilfilterelement fest eingepaßt ist und auch bei starken Belastungen unverrückbar gehalten wird.

Sofern durch nicht berechenbare kritische Bedingungen das Filter überlastet

Schema 1: Sterile Belüftungssysteme in der Fermenter- und Prozeßtechnik.



wird, öffnen sich die Sicherheitsventile. Bei der Sterilisation mittels Dampf wird das komplette Filter mit desinfiziert.

3. Eigenbelüftung durch Vent-Filter (Abb. 4)

Der größte industrielle Bedarf besteht darin, Keimwachstum in sogenannten sterilen Behältern nicht durch in der Luft enthaltene Keime zu beschleunigen, sondern in einer zeitlichen Grenze zu halten.

In den Fällen, wo eine weitere Kontamination von außen verhindert werden soll,

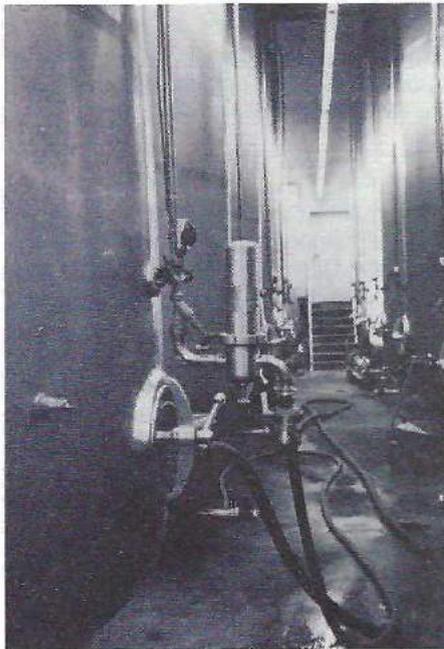


Abb. 4
Nach dem Sterilisationsvorgang werden diese großen Lagertanks mit steril-gefilterter Druckluft kalt- und trocken geblasen

wo nach der Sterilisation des Tanks und während der Lagerung eine sterile Beatmung unkontrollierbares Keimwachstum verhindern soll, erfolgt der Einsatz der Vent-Filter.

Das direkt auf dem Tank aufgeschraubte Filterelement wird durch Edelstahlschutzkappen vor äußeren Einwirkungen wirkungsvoll geschützt (Regen, Schmutz, Spritzwasser).

Eine vom Tank unabhängige Sterilisierung wird empfohlen.

Auswahlkriterien

Es gibt eine ganze Reihe von Gesichtspunkten, die für die Auswahl der technisch optimalen Aufbereitungsanlage berücksichtigt werden müssen. In den vor-

angegangenen Beschreibungen wurden die Kriterien hinsichtlich der geforderten Reinheit bei gleichzeitiger Betrachtung der Sicherheit beschrieben. Hier geht es nun um die technischen Auslegungsdaten, daß heißt die Bestimmung der Größe einer Be- und Entlüftungsanlage.

1. Füllmenge

Die Größe des Filters ist nur bedingt abhängig von dem Inhalt des Lagertanks. Entscheidend ist die maximale Abfülleistung pro Zeiteinheit beim Befüllen und beim Entleeren des Tanks (in l/min. oder m³/h).

Als Leistung setzt man die höhere der beiden Pumpenleistungen ein.

2. Statische Belastbarkeit des Tanks

Lagertanks können meist nur geringe Unterdrücke und etwas höhere Überdrücke vertragen. Zur Sicherheit sind an vielen Tankanlagen Vakuumventile und Überdruckventile installiert. Wird eine absolute Sterilität verlangt, sollte auf den Einsatz solcher Instrumente verzichtet werden. Neben der Gefahr eines Keimdurchlasses bei Öffnen der Ventile muß auch beachtet werden, daß jedes Ventil eine unkontrollierbare Brutstätte für Keime darstellt.

Bei der Auswahl eines Filters muß also der maximal zulässige Unterdruck im Tank berücksichtigt werden. Jedes Filterelement hat einen Widerstand: Im Neuzustand ist der Widerstand meist sehr gering, mit zunehmender Betriebszeit wird das Filterelement aber durch Verunreinigungen zugesetzt. Der Widerstand steigt dadurch (Abb. 3).

Das Druck-Verhältnis $P_1:P_2$, also die Sicherheit der Auslegung für den trockenen Zustand, sollte das Verhältnis 1:1 nicht überschreiten. Bei Erreichen des zulässigen Widerstandes ist ein Auswechseln der Filterelemente erforderlich. Die Kennlinie eines Filterelements im feuchten Zustand sollte unterhalb der maximal zulässigen statischen Belastung eines Tanks liegen. Die Durchflußleistung sollte so gewählt werden, daß der Anfangswiderstand des neuen Filterelements 20% des maximal zulässigen statischen Druckes beträgt.

3. Dämpfung einer Tankanlage

Bei der Sterilisation mit Dampf sind zwei Punkte ganz besonders zu beachten:

- Der Dampfdruck darf den max. zulässigen Tankdruck nicht überschreiten.
- Bei der Abkühlung, also beim Zusammenbruch des Dampfdruckes, darf der maximal zulässige Unterdruck im Tank nicht erreicht werden.

Wie schon unter Punkt 2. beschrieben, sind in vielen Fällen für die Sicherung Unter- und Überdruckventile eingebaut. Die Abkühlung des Tanks kann entweder durch Einsprühen von steril gefiltertem Wasser oder durch Kalt- und Trockenblasen mittels steriler Druckluft erfolgen.



Abb. 5
Werden VA-Lagertanks sterilisiert und anschließend mit Kaltwasser abgekühlt, sind große Luftvolumina in kurzer Zeit für den Druckausgleich erforderlich. Hier werden großvolumige in-line sterilisierbare BE-Filter eingesetzt.

Abkühlung durch Kaltwasser

Bei dieser Form der Reinigung eines Tanks überlagern sich zwei schwierige Probleme der Belüftung:

- Kurzfristiger Zusammenbruch des Dampfdruckes, daß heißt innerhalb weniger Sekunden muß ein Großteil des Behältervolumens durch nachströmende Luft ausgeglichen werden.
- Das Filtermedium ist mit Kondensat benetzt, das heißt der Widerstand von Filterelementen mit Tiefenfiltrationswirkung folgt den Gesetzmäßigkeiten nach Kurve 1 der Abbildung 8, wasserundurchlässige Filtermedien entsprechen der Kurve 2 der Abbildung 8.

Kaltblasen durch sterile Druckluft

Wie man aus den Diagrammen (Abb. 9) ersehen kann, ist bei der Abkühlung durch Kaltwasser kurzfristig ein enormer Luftbedarf erforderlich. Deshalb ist eine diskutabile Alternative das Kaltblasen durch zugeführte steril gefilterte Luft.

Sekundärinfektionen durch unsteriles Wasser sind ausgeschlossen, ein schwer beherrschender Abkühlungsverlauf mit der Gefahr einer Vakuumbildung ist vermieden. Druckluft oder Gebläseluft wird über einen Sterilfilter mit reduziertem Druck steril in den Behälter eingeblasen. Dabei nimmt die Luft frei werdende Kondensationswärme auf und erwärmt sich.

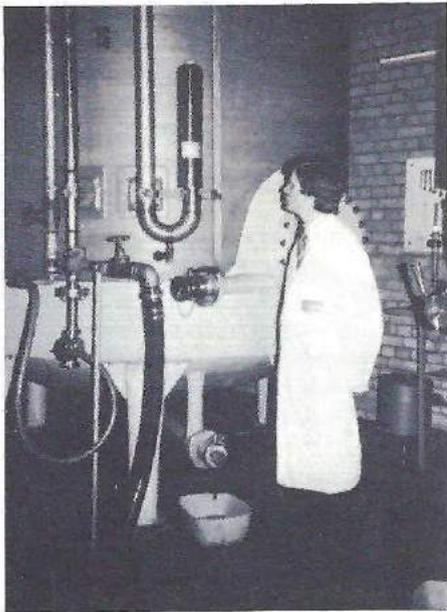


Abb. 6
Ventfilter für Produktlagertanks, das Filterelement wird durch eine aufgesetzte Haube vor Spritzwasser und anderen äußeren Einflüssen geschützt

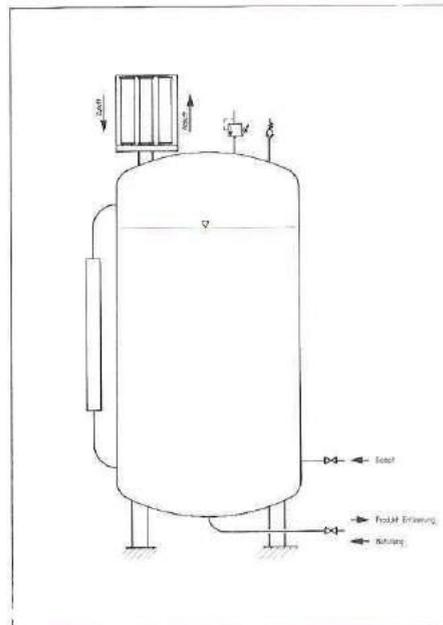


Abb. 7
Eigenbelüftetes Tanksystem mit in-line sterilisierbarem Be- und EntlüftungsfILTER

Abkühlung durch freie Konvektion
Die Wärmeabgabe des gedämpften Tanks durch Strahlung und Konvektion vom heißen Tank an die kalte Umgebung folgt den Gesetzen $Q = k \cdot \Delta t \cdot F$. Für die Berechnung der Luftvolumina sind in Tab. 2 anhaltswise Wärmeübergangszahlen abgebildet.

Δt	grd	α_a	kcal/m ² h grd
60			10,0
80			10,7
100			11,6

Tab. 2
Wärmeübergangszahlen bei freier Konvektion. Tanks in Inneninstallationen bei ca. 20° C.

Dem Praktiker ist damit die Berechnung der Luftmengen für die Abkühlung und damit die Dimensionierung einer Be- und Entlüftungsanlage ermöglicht.

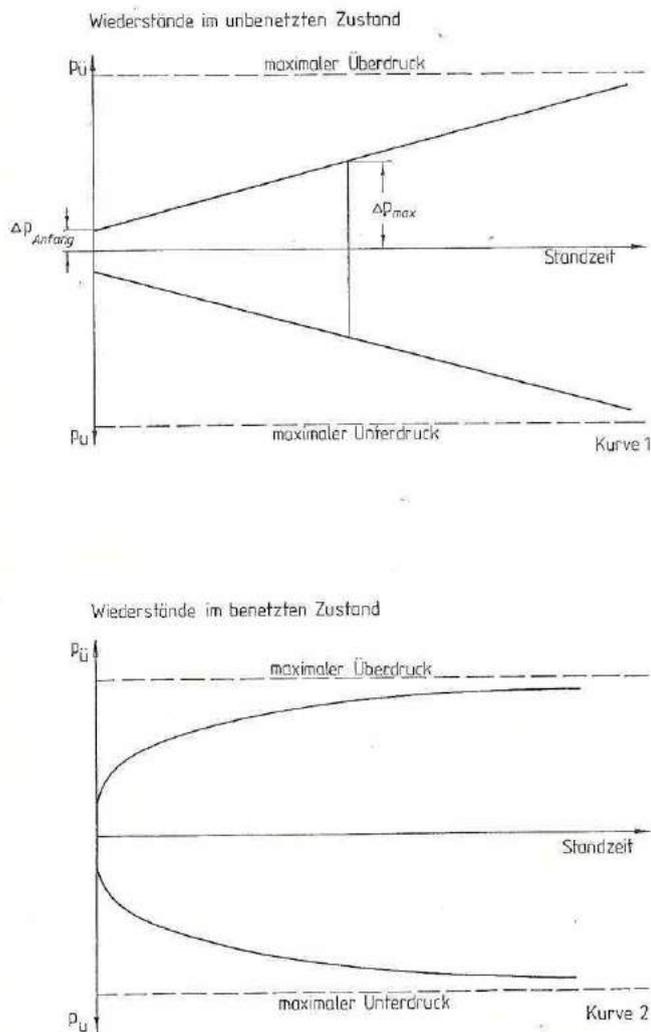


Abb. 9
Effektiv erforderlich nachströmende Luftmenge mit Dampfsterilisierten Tanks bei verschiedenen Abkühlzeiten.

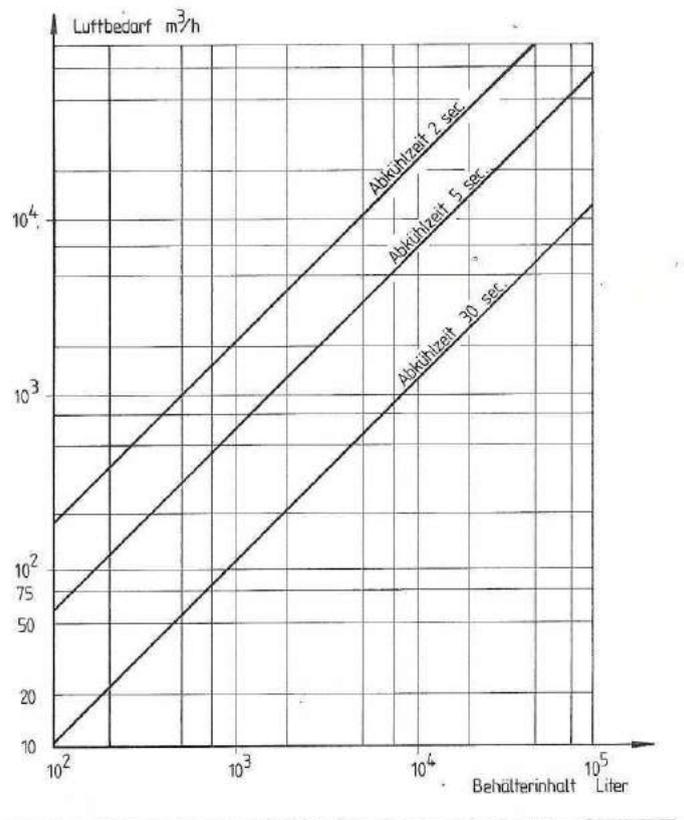


Abb. 8
Graphische Darstellung der Differenzdrücke von Be-Filtern. Die erreichbaren Druckverluste der Sterilfilter müssen unterhalb der zulässigen statistischen Drücke liegen.

Beispiele aus der Praxis

Zur Abrundung des Themas noch praktische Beispiele:

Laminar Flow Belüftung (Abb. 10)

Bakteriologische Problemstellungen treten bei allen Abfüllvorgängen auf. Um lange Haltbarkeitszeiten bei verderblichen oder hochreinen Produkten zu erzielen, müssen Produkt, Verpackungsmaterial sowie Umgebungsluft weitgehendst steril sein.

Deshalb werden Verpackungsmaschinen luftseitig mit dem Laminar Flow System betrieben. (Definierte Luftkolbenströmung bei geringem Überdruck).

Ventilator-Belüftung

Die Lagerung von verderblichen Nahrungsmitteln über einen langen Zeitraum stellt besondere Anforderungen an eine Be- und Entlüftungsanlage.

In solchen Fällen wählt man vornehmlich Zwangsbelüftungssysteme. Da die benötigten Luftvolumina häufig sehr groß sind, nehmen die Anwender aus Energie- und Kostengründen Abstand von Druckluft als Belüftungsmedium. Eine preiswerte Alternative ist hier die Komprimierung der Luft durch Ventilatoren mit anschließender Endstellenfiltration durch großvolumige Sterilfilter.

Fermenter-Be- und Entlüftung

(Abb. 11)

Für die Würzebelüftung und Hefereinzuchtanlagen ist Luft ein wesentlicher Grundstoff für den Fermentationsprozeß, um eine Verwirbelung innerhalb des Be-



Abb. 10
Sterilfilter an einer Verpackungsmaschine. Die Desinfektion wird durch Dampf oder H_2O_2 durchgeführt.

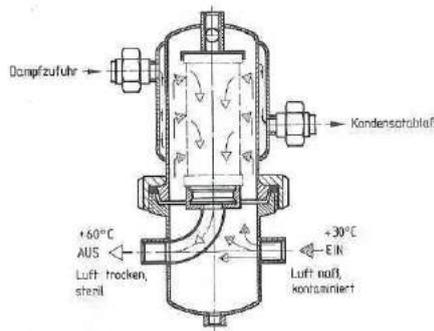


Abb. 11
Dampfbeheizte Sterilfilter ermöglichen den Einsatz von ultrafilter-Sterilfiltern mit Tiefenfiltrationswirkung.

hältern zu bewirken und um den notwendigen Sauerstoff für die Reaktion zu stellen. Die Luft muß letztendlich steril sein. Ein ultrafilter-Sterilfilter vom Typ SRF filtert die Zuluft steril. Damit von der Abluftseite keine Kontaminanten ins System gelangen können, gleichfalls auch zum Schutz der Umwelt vor gefährlichen Keimen, die evtl. beim Fermentationsprozeß frei werden könnten, wird ein dampfbeheizter ultrafilter-Sterilfilter vom Typ SRF eingesetzt.

Belüftung von heißen Lagertanks

Destilliertes Wasser, heiße Produkte, Heißwasser etc. werden in großen Mengen in der Industrie benötigt.

Wachstum von Keimen wird durch eine Lagerung bei $80^\circ C$ weitgehendst eingeschränkt; damit keine Mikroorganismen aus der Luft in das gelagerte Produkt gelangen, werden Sterilfilter für die Beatmung der Tanks eingesetzt.

Belüftung von Produktlagertanks

(Abb. 12 und 13)

Die Firma Aspera Riese beschäftigt sich u. a. mit der Herstellung von Zuckercouleur. Zuckercouleur gewinnt man z. B. durch Erhitzen von Zucker, es bildet sich hierbei eine dunkelbraune Masse, die wasserlöslich ist. Zuckercouleur benötigt man z. B. zum Färben von Bieren, Likören etc.

Dieser Grundstoff bietet Mikroorganismen optimale Bedingungen zur Vermehrung. Deshalb schützt man die Lagertanks durch entkeimende Be- und Entlüftungsfiler. Bei der Befüllung, Entleerung und Lagerung herrschen somit sterile Luftbedingungen.

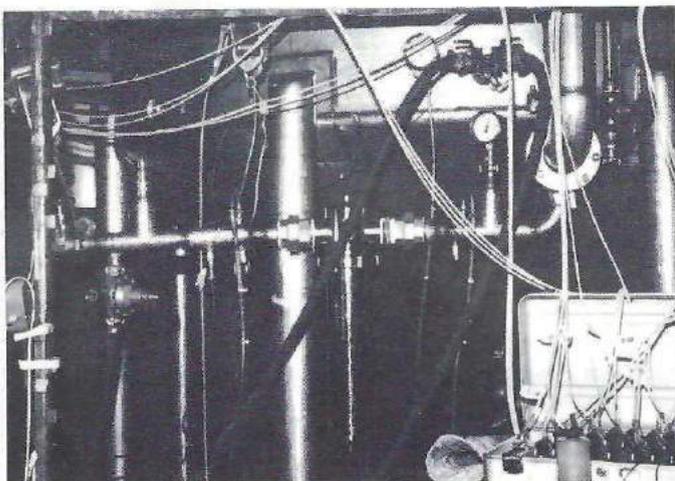


Abb. 12
Exzessive Versuche haben das Problem der Belüftung von abkühlenden Tanks durch freie Konvektion durchleuchtet.

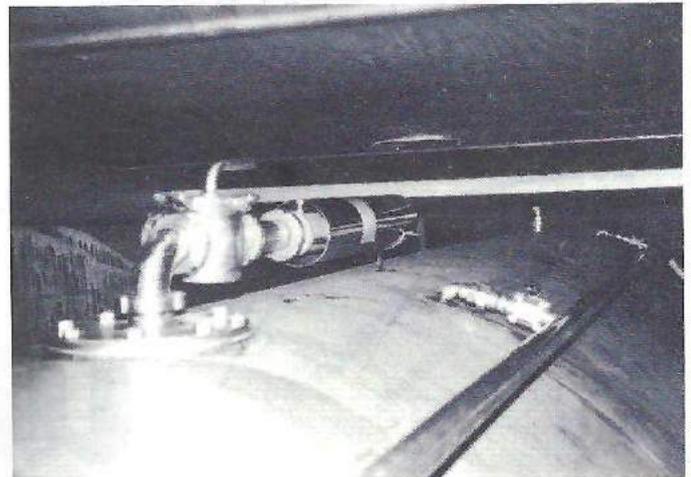


Abb. 13
Vent-Filter für Produktlagertanks auf Lkw's.

Filtration technischer Gase

– Teil I –

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von technischen Gasen lassen ahnen, wie mannigfaltig die Problemstellungen sind, die bei der Aufbereitung dieser Medien auftreten können. Um in anschaulicher Weise auf diese Problemstellungen eingehen zu können, beschränkt sich der Autor im Teil I dieses Beitrages auf das Medium Druckluft.

Technische Gase und Luft werden in vielfältiger Weise in der Industrie eingesetzt. In vielen Fällen handelt es sich um komprimierte Gase, die entweder als Energie- oder als Prozeßmedium zur Anwendung kommen. Grob kann man unterscheiden zwischen:

- Technische Gase, die in sich eine Energie darstellen. Hier kennen wir die Druckluft, die beispielsweise in der Pneumatik als Arbeitsenergie eingesetzt wird.
- Technische Gase, die einen Prozeß auslösen/fördern oder Produkt eines Prozesses sind. Hier kennen wir die Druckluft, die zum Beispiel bei der Fermentation einen Prozeß begünstigt oder aber das Ammoniakgas, das bei der Ammoniaksynthese gewonnen wird und in sich ein Produkt darstellt.

Die Ursache

Verunreinigungen in der Luft/Druckluft treten in verschiedenen Formen und Zuständen auf:

- als Feststoffe (Staub, Abrieb, Mikroorganismen usw.)
- als Flüssigkeit in der fließfähigen Phase (Wasser, Wasserkondensat, Wassernebel, Öltropfen, Önebel und Aerosole und andere Nebel)
- als Gas in der dampfförmigen Phase (Wasserdampf, Geruchsstoffe, Öldampf und andere Gase)

Feststoffe bezeichnet man im allgemeinen als Staub. Eine sinnvolle Klassifizierung der Feststoffe in drei Klassen nach ihrer Größe sieht wie folgt aus:

- Grobstäube mit einer Partikelgröße von mehr als 10 Mikron,
- Feinstäube, deren Partikelgröße zwischen 10 und 1 Mikron liegen,
- Feinststäube, die kleiner als 1 Mikron sind (Schwebstoffe).

Besondere Aufmerksamkeit gilt bei der Gruppe der Feststoffe den Mikroorganismen. Wir unterscheiden bei den Mikroorganismen Bakterien, Bakteriophagen, Viren, Hefe, Schimmelpilze usw. Bild 1 und Tafel 2 geben dem Praktiker Hinweise über Menge, Teilchengröße und Teilchenzahl von Verunreinigungen in atmosphärischer Luft. Gleichzeitig wird in Bild 1 eine Klassifizierung über den wirtschaftlichen Einsatz von Filtern gemacht.

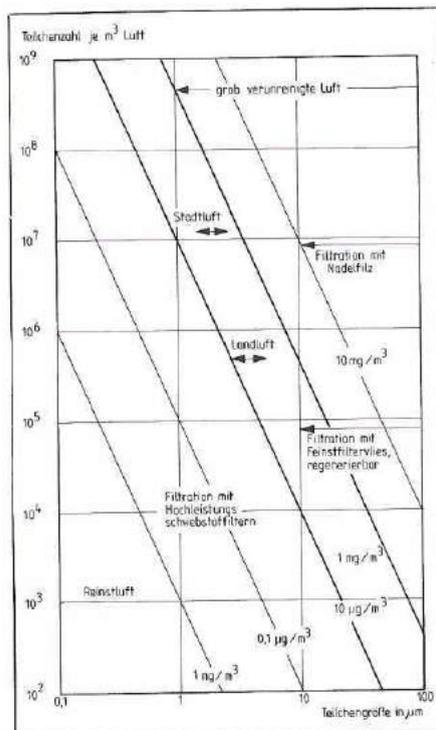


Bild 1 Reinheitsgrad der Luft im Verteilungsdiagramm

Bild 3 Beziehung zwischen Betriebstemperatur und Öldampfanteil in verdichteter Luft

Ähnlich wie bei den Feststoffen gibt es auch bei den *Flüssigkeiten* eine Klassifizierung hinsichtlich der Größe. Man unterscheidet hier Sprühregen mit Tröpfchen von 100 Mikron und mehr, feinen Sprühregen mit Tröpfchen die größer sind als 50 Mikron, Nebel mit Tröpfchen zwischen 0,5 und 50 Mikron sowie Feindunst mit Tröpfchen von 0,01 bis 1 Mikron. Wasser in flüssiger Form tritt in Druckluftsystemen aufgrund der Verdichtung feuchtigkeitsbeladener atmosphärischer Luft auf. Jeder Kubikmeter Luft kann in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur eine gewisse Menge Wasserdampf tragen. Wird die Menge überschritten, „kondensiert“ der überschüssige Wasserdampf und man erhält Wasser in flüssiger Form. Öle und Önebel gelangen durch Fertigungsprozesse als Schmiermittel bei schnelllaufenden Maschinen oder zum Beispiel durch Auspuffluft in die Atmosphäre. Die so verunreinigte Luft wird vom Verdichter angesaugt und auf Betriebsdruck komprimiert. Je nach Art des Kompressors werden hier wiederum Öle zur Schmierung eingesetzt.

Wenn infolge punktförmiger hoher thermischer Belastung Öle verdampfen (vercracken), wird das Öl aggressiv. In der nachfolgenden Rohrleitung kondensiert der Dampf und bildet Nebel mit einem Kornspektrum von kleiner als 1 Mikron bis herab zu 0,01 Mikron. Önebel entstehen auch durch Scherung an Zylindern, Drehteilen usw. Das so zerstäubte Öl liegt in den Grö-

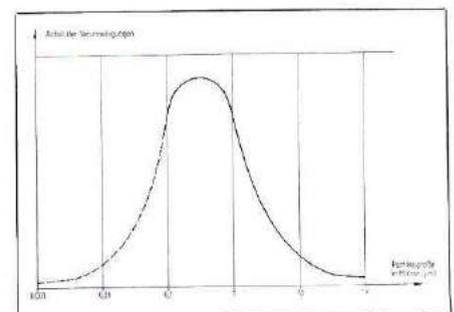


Bild 2 Verteilungskurve von kondensiertem Verdichterdampf

