

Anlagen zum Ultrahoherhitzen von Lebensmitteln — Stand der Technik und Optimierung*

Helmut Reuter**

Als Ultrahoherheizungsverfahren gelten kontinuierliche Verfahren zum Haltbarmachen fließfähiger Lebensmittel durch Erhitzen auf 135 bis 150 °C für die Dauer von einigen Sekunden. Die so sterilisierten Lebensmittel werden unter sterilen Bedingungen in sterile Packungen abgefüllt, die unter sterilen Bedingungen keimdicht verschlossen werden. UHT-Verfahren werden heute besonders in der Milchverarbeitung zur Haltbarkeitsverlängerung von Milch, Sahne, Puddings, Desserts, aber auch von Suppen und Soßen angewendet. Gegenwärtig kommt die 3. Generation der UHT-Anlagen auf den Markt. Nach Art der Wärmezufuhr unterscheidet man zwischen direkt arbeitenden Anlagen mit Dampfinkjektion und indirekten Anlagen mit Wärmeaustauschern. Hochviskose Medien werden in Rieselfilmerhitzern direkt durch Dampf erhitzt. UHT-Anlagen müssen in regelmäßigen Zeitabständen nach 6 bis 12 Betriebsstunden gereinigt werden, um die im oberen Temperaturbereich auf den Wärmeaustauschflächen gebildeten Ablagerungen zu entfernen. Von wirtschaftlicher Bedeutung sind daher die Standzeit der Anlagen, der durch Wärmeaustausch erzielbare Wärmehintergewinn der Anlage, der für direkte Anlagen zwischen 40 bis 50%, für indirekte zwischen 60 bis 80% liegt, der Grad der Automatisierung, die Meß-, Regel- und Sicherheitseinrichtungen sowie der Wartungs- und Reparaturaufwand. Eine Optimierung der Anlagen kann unter verschiedenen Zielvorstellungen erfolgen. Die für Lebensmittel allgemein bedeutendste Zielgröße ist die Produktqualität, die vorrangig durch das Temperatur/Zeit-Verhalten der Anlagen bestimmt wird. Zur Optimierung der thermischen Wirksamkeit der Anlagen können die in der Konserventechnik bewährten Sterilisationswerte, *F*- und *C*-Werte, dienen. Durch eine reaktionskinetische Betrachtung und bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen ist nachweisbar, das *F*- und *C*-Werte auch für den Temperaturbereich der UHT-Verfahren anwendbar sind.

Plant for ultra-high temperature processing of foodstuffs — State of the art and optimization. Continuous ultra-high-temperature processes operating at temperatures between 135 and 160 °C, for a few seconds, are high suitable for the preservation of liquid foodstuffs. Food sterilized in this way is packed under sterile conditions into sterilized containers which are then hermetically sealed. UHT-processes find application not only in the processing of milk, cream, puddings and desserts, to increase its storage lifetime, but also in the processing of soups and sauces. Currently, the third generation of UHT-equipment is appearing on the market. Depending on the method of heat supply, a distinction can be made between directly operated equipment having steam injection and indirectly operated equipment having heat exchangers. Highly viscous media are directly steam heated in wethed wall heaters.

UHT-equipment must be regularly cleaned at 6 to 12 working hour intervals, to remove deposits formed on the heat exchanger surface at high temperatures. Thus, the length of time that the equipment is nonoperational, together with its degree of automation, its measuring, regulating and safety devices as well as maintenance and repair costs are of economic significance.

Equipment optimization can be achieved under several headings. In the foodstuffs' industry, product quality is of prime importance and this is principally determined by the temperature/time ratio. For optimization of the thermal efficiency of the equipment, the sterilization parameters, *F*- and *C*-values, approved for use in preservation technology, can be used. By means of a study of reaction kinetics, it has been established that the *F*- and *C*-values can also be applied in the temperature range of UHT-processes.

1 Einleitung

Prozesse zum Haltbarmachen von Lebensmitteln gehören zu den wichtigsten Techniken der Lebensmittelverarbeitung. Ihre Bedeutung ist in den letzten Jahrzehnten durch die steigende Weltbevölkerung und zunehmende Ernährungsschwierigkeiten in vielen Ländern noch gestiegen.

Unter den Grundprozessen zum Haltbarmachen von Lebensmitteln kommt dem thermischen Sterilisieren und Pasteurisieren wegen der problemlosen, keine Energie benötigenden langen Lagermöglichkeit der auf diese Weise behandelten

Lebensmittel weltweit eine herausragende Bedeutung zu. Thermisches Sterilisieren und Pasteurisieren unterscheiden sich durch die angewendeten Temperaturen. Sterilisieren liefert keimfreie, praktisch haltbare Produkte; Pasteurisieren führt wegen eines geringen Letalitätseffektes durch niedrigere Temperaturen oder kürzere Zeiten zu Lebensmitteln verminderten Mikroorganismengehaltes und gehemmter Enzymaktivität, die dementsprechend, wie z. B. Milch oder Fischpräserven, nur begrenzte Lagerfähigkeit aufweisen. Je nach dem beabsichtigten Zweck und je nach dem zu konservierenden Gut wird der eine oder andere Verfahrensvorgang bevorzugt. Verarbeitungsprozesse wie das Pasteurisieren oder Sterilisieren, die durch Zufuhr von Wärme unter Einwirkung von Temperatur und Zeit ablaufen, bewirken in den Produkten erwünschte und unerwünschte Veränderungen. Als erwünschte Veränderungen werden die Zerstörung von Enzymen und Mikroorganismen bzw. deren Sporen angestrebt.

* Nach einem Vortrag auf dem Jahrestreffen der Verfahrens-Ingenieure, 1. bis 3. Okt. 1980 in Straßburg.

** Prof. Dr.-Ing. H. Reuter, Institut für Verfahrenstechnik der Bundesanstalt für Milchwissenschaft, Hermann-Weigmann-Str. 1-27, D-2300 Kiel 1.

Als unerwünschte treten Veränderungen von Geschmack, Farbe, Konsistenz und ein Abbau von Nährstoffen auf. Die Verarbeitungsprozesse, durch die derart gegenläufige Effekte ausgelöst werden, sollten hinsichtlich ihres Temperatur/Zeit-Verhaltens derart optimiert werden, daß der erwartete Effekt mit Sicherheit erreicht, unerwünschte Veränderungen im Produkt aber minimiert werden. Ein gut geführter Sterilisationsprozeß muß demnach ein Optimum aus diesen gegensätzlichen Forderungen anstreben. Diesen Bemühungen kommt nun sehr zu Hilfe, daß die beiden Gruppen – Mikroorganismen auf der einen und Inhaltsstoffe der Lebensmittel auf der anderen Seite – unter der Einwirkung von Zeit und Temperatur sehr unterschiedlich abgebaut werden.

Der allgemeine Grundsatz für das thermische Behandeln von Lebensmitteln lautet: Möglichst hohe Temperatur und kurze Zeit. Die Entwicklungstendenz auf dem Gebiet der Sterilisationstechnik folgt diesem Grundsatz und ist darauf ausgerichtet, den Vorgang des Wärmetransportes in das Lebensmittel hinein und aus dem Produkt wieder heraus derart zu verbessern, daß möglichst kurze Zeiten zum Erwärmen oder Abkühlen erreicht werden. Ein gutes Beispiel für diesen Trend bieten die mit sog. ultrahoher Temperatur arbeitenden Sterilisationsverfahren, die UHT-Verfahren. (Der Begriff „ultrahohe Temperatur“ ist sicherlich sehr fragwürdig, aber weltweit – im Englischen Ultra-High Temperature – eingeführt.)

Die verfahrenstechnischen Probleme bestehen darin, einmal den Wärmetransport zwischen einem Wärmeträger und dem Lebensmittel zu verbessern, und zum anderen den Prozeß hinsichtlich der thermisch bedingten Abbauvorgänge zu optimieren.

2 Formalkinetik thermisch bedingter Abbauvorgänge und Bildungsreaktionen

Für das Zeitgesetz thermisch bedingter Abbauvorgänge kann, wenn es sich um einfache, nicht komplexe Vorgänge handelt, allgemein eine Reaktion 1. Ordnung zugrunde gelegt werden¹⁾:

$$dN = -k_{(T)} N_0 dt. \quad (1)$$

Die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten wird für Elementarreaktionen durch die Arrhenius-Gleichung angegeben:

$$k = A e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (2)$$

Der Faktor A und die Aktivierungsenergie E sind in biologisch relevanten Temperaturbereichen unabhängig von der Temperatur und konstant. Kombination der Gln. (1) und (2) liefert

$$\ln \frac{N_0}{N} = A \int_{t_0}^t e^{-\frac{E}{RT}} dt. \quad (3)$$

Mittels Gl. (3) läßt sich die absolute Abbauraten einer Wärmebehandlung berechnen, wenn es sich um eine einfache, nicht komplexe Reaktion handelt, die nach der Arrhenius-Gleichung abläuft, sowie die Aktivierungsenergie E , der Faktor A und der Temperatur/Zeit-Verlauf $T = f(t)$ bekannt sind.

Der Zahlenwert des Integrals der Gl. (3) ergibt einen relativen Wert, mit dem man die Auswirkungen unterschiedlicher Wärmebehandlungen vergleichen kann. Die praktische An-

wendung von Gl. (3) zur Berechnung wärmebedingter Abbaureaktionen wird gegenwärtig noch behindert durch zu geringe Kenntnis der Konstanten E und A .

Neben der Temperatur hängt die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante von der Höhe der Aktivierungsenergie ab. Die Zerstörung von Mikroorganismen beruht auf einer unter der Temperatureinwirkung auftretenden Protein-Denaturierung. Für die Protein-Denaturierung als Abbaureaktion sind hohe Aktivierungsenergien (E zwischen 300 und 840 kJ/mol) bekannt, während für chemische Reaktionen die Aktivierungsenergien (mit E zwischen 60 und 120 kJ/mol) wesentlich niedriger liegen. Reaktionen mit hoher Aktivierungsenergie ergeben nach Abb. 1 wegen des steileren Anstiegs der Geraden mit steigender Temperatur eine größere Geschwindigkeitskonstante und führen nach Gl. (3) zu höheren Abbauraten. Die Anwendung dieser reaktionskinetischen Zusammenhänge führt zu dem vorgenannten allgemeinen Grundsatz für die Temperatur/Zeit-Führung von Sterilisations-Prozessen und zu produktchonenderen Hochtemperatur/Kurzzeit-Verfahren.

In der Sterilisationstechnik ist bisher der Weg über Gl. (4) beschritten worden, um den Sterilisationseffekt zu berechnen:

$$\lg \frac{N_0}{N} = \frac{1}{D_B} \int_{t_0}^t 10^{\frac{z-T}{z-T_0}} dt. \quad (4)$$

Gl. (4) bietet den Vorteil, daß man nur den besser bekannten z -Wert und den auf eine Bezugstemperatur bezogenen D -Wert benötigt. Es muß jedoch gesichert sein, daß innerhalb des zu betrachtenden Temperaturbereichs der z -Wert konstant ist. Dies ist normalerweise in Temperaturbereichen $\Delta\theta \leq 30^\circ\text{C}$ gegeben.

Für einen Temperaturbereich mit konstantem z -Wert stellt Gl. (4) eine Näherungsgleichung der exakten Abbaugleichung (3) dar. Der Zahlenwert des Integrals von Gl. (4) stellt die in der Sterilisationstechnik seit Ball [1] eingeführten und als F -Wert bekannten Sterilisationswerte dar.

Bei einigen chemischen Veränderungen während eines Sterilisationsvorgangs können unerwünschte Stoffe, Aroma- oder Farbstoffe, neu gebildet werden. Zu diesen Reaktionen, die durch kleine Umsetzungen oft starke Geruchs- und Geschmacksabweichungen im Produkt ergeben, zählt die Maillard-Reaktion.

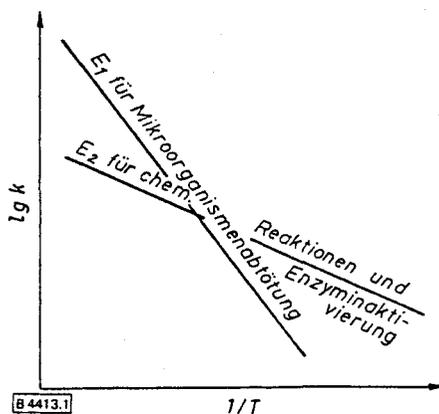


Abb. 1. Abhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten von der Temperatur und der Aktivierungsenergie nach der Arrhenius-Gleichung, $E_1 > E_2$.

1) Formelzeichen am Schluß der Arbeit.

Die Kinetik der Bildungsreaktionen solcher Stoffe kann in ähnlicher Weise behandelt werden wie die Kinetik der Abbauvorgänge. Für die reaktionskinetische Betrachtung der Bildungsreaktionen hat *Herrmann* [2] die Grundlagen in allgemeiner Form entwickelt und dargestellt, auf die nachfolgend Bezug genommen wird.

Bei den Bildungsreaktionen kann man sich vielfach auf den unteren Bereich der Neubildung, auf den Bereich geringen Umsatzes, beschränken, indem man in erster Näherung die

einen linearen Verlauf zeigen; erst oberhalb, bei höheren Umsätzen, weichen sie zunehmend stärker voneinander ab. Eine von *Herrmann* eingeführte Zeitgröße H kann in ähnlicher Weise verwendet werden wie der D -Wert, der sich auf Abbaureaktionen bezieht.

In ähnlicher Weise wie für Abbaureaktionen kann man auch für Bildungsreaktionen einen z -Wert bestimmen der die notwendige Temperaturänderung angibt, um die neugebildete Menge an Stoff um den Faktor 10 bzw. $\frac{1}{10}$ zu ändern. Man berechnet nur die Neubildung in der gleichen Weise wie den Abbau für Abbaureaktionen. Die unter veränderlichen Temperaturen neugebildete Menge X errechnet sich dann zu

$$X = \frac{1}{10} \int_{t_0}^t 10^{\frac{z - z_{H=1}}{z}} dt. \quad (5)$$

Das Integral der Gl. (5) entspricht dem Sterilisationswert, der für Abbaureaktionen gebildet wird.

3 UHT-Prozeß

Wärmebehandlungsverfahren, die mit ultrahoher Temperatur arbeiten – UHT-Verfahren – werden charakterisiert durch einen sehr kurzzeitigen Erhitzungsvorgang mit hoher Temperaturveränderungsgeschwindigkeit auf 135 bis 150°C mit sehr kurzen Heißhaltezeiten von 2 bis 8 s und nachfolgendem ebenso kurzzeitigem Abkühlen. Als integrierter Teil des Verfahrens schließt sich ein aseptisches Abpacken des sterilen oder fast sterilen Produktes an. Das Abpacken erfolgt für Produkte mit geringer Viskosität – wie Milch und Milchgetränke – bei einer Temperatur von 20°C, für Produkte mit höherer Viskosität – wie Puddings und Desserts – bei etwa 40°C. Auf der Transportstrecke, im allgemeinen ein Rohrleitungssystem, zwischen der Wärmebehandlungseinheit und einer aseptischen Verpackungseinheit darf das Produkt nicht mit einer nichtsterilen Umgebung in Kontakt kommen.

Für die UHT-Verfahren ist das aseptische Verpacken des wärmebehandelten Produktes ein integraler Bestandteil der Technologie und vom Verfahren nicht zu trennen. Es sind Maschinen auf dem Markt, die bei sorgfältiger Aufstellung, Wartung und Bedienung die erwartete Funktion erfüllen. Das aseptische Verpacken ist aber das schwächste und stör anfälligste Glied eines UHT-Verfahrens. Ein Verderben eines ultrahoherhitzen und aseptisch abgefüllten Produktes ist in der Mehrzahl der vorkommenden Fälle auf eine Störung an der Verpackungsmaschine und dadurch entstandene Rekontamination zurückzuführen. Im Rahmen dieses Beitrages wird auf das aseptische Verpacken jedoch nicht näher eingegangen.

Zwischen der UHT-Anlage und den aseptischen Abfüllmaschinen wird vielfach ein Aseptiktank installiert. Der Tank dient als Puffer und zeitweilig als Vorratsbehälter für sterilisiertes Produkt. Bei schwankender Abnahme durch die Abfüllmaschinen infolge von Störungen kann die UHT-Anlage mit voller Leistung weiterlaufen, da die überschüssige

Produktion im Tank gelagert wird. Die Auslastungen von UHT-Anlage und Abfüllmaschine können mittels eines zwischengeschalteten Tanks besser aufeinander abgestimmt werden.

Auch ein Transportieren des sterilen Produktes in einem mobilen Steriltank über eine längere Zeit und Strecke und aseptisches Abpacken aus dem Steriltank heraus ist durchführbar.

Das Ultrahoherhitzen ist keineswegs eine ganz neue Idee.

Iensen

[3] – diese Art der Prozeßführung bereits an und ließ sie 1921 als aseptisches Konservierungsverfahren patentieren. Schon 1923, so berichtete *Procter* [4], gelangte aseptisch abgefüllte Milch von einer Anlage in Südafrika als einwandfreies Produkt zu einer Londoner Ausstellung. Das Verfahren geriet jedoch in Vergessenheit, bis Ende der vierziger Jahre ein Molkerei-Unternehmen und eine Maschinenfabrik in der Schweiz (Alpura AG, Bern, und Fa. Sulzer, Winterthur) die Entwicklung eines UHT-Verfahrens für Milch wieder aufgriffen. Ausgehend von den Erkenntnissen, daß beim Sterilisieren von Milch mit möglichst hoher Temperatur und kürzester Zeit die geringsten Veränderungen der Rohmilch-Eigenschaften auftreten, kam man bei extremer Auslegung dieses Grundsatzes zu dem als Uperisation bezeichneten Verfahren, bei dem die Milch durch eine Injektion reinen Dampfes in extrem kurzer Zeit von 80 auf 150°C erwärmt wurde. Nach einer Heißhaltezeit von 2,4 s wurde durch Entspannen der unter Druck stehenden Milch in ein Vakuumgefäß in einem ebenso kurzzeitigen Vorgang ein Abkühlen auf 82°C erreicht [5, 6].

Zur Zeit gelangt bereits die 3. Generation der UHT-Anlagen – nach der eigentlichen Uperisation als 1. Generation und den Anlagen der 60er und 70er Jahre als 2. Generation – auf den Markt, die sich hinsichtlich des Aufbaues und der Verfahrensführung von den vorausgegangenen Anlagentypen unterscheidet und die den Bestrebungen zur technischen Rationalisierung im Verarbeitungsbetrieb sowie zur Energieeinsparung stärker entspricht.

Aufgrund gesetzlicher Regelung muß in der Bundesrepublik Deutschland jegliche Milch, die in einem milchverarbeitenden Betrieb angeliefert wird, durch eine geeignete und zugelassene Wärmebehandlung erhitzt werden, um die Übertragung von Krankheitserregern vom Tier auf den Menschen und von Tier zu Tier zu unterbinden. Neben diesem hygienischen Zweck hat die Wärmebehandlung eine herausragende Bedeutung zur Verbesserung der Haltbarkeit des mikrobiologisch und enzymatisch sehr anfälligen Rohstoffes Milch.

Für Milch und Milchprodukte wird aus Gründen unerwünschter sensorischer Veränderungen unter zu hoher Temperatur- und Zeiteinwirkung weniger eine Langzeit-Haltbarkeit wie bei einer Vollkonserve, z. B. bei Steril- oder Kondensmilch, angestrebt, sondern meist nur eine verlängerte Haltbarkeit. Diese kann für eine Dauer von einigen Tagen durch Pasteurisieren, für eine längere Dauer von einigen Wochen oder Monaten durch eine UHT-Behandlung erreicht werden. Die UHT-Verfahren liegen damit zwischen den Pasteurisier- und den Sterilisierverfahren.

4 Stand der Technik

Gegenwärtig werden in der Bundesrepublik Deutschland etwa 15 verschiedene Anlagentypen zur Herstellung von Milchprodukten betrieben. An Produkten werden hergestellt: H-Milch mit unterschiedlichen Fettgehalten, H-Milchkakao, aromatisierte H-Milch, sog. Milchkischgeträn-

ke, Fruchtsäfte und Kaffee-Sahne. Neben diesen dünnflüssigen Produkten gibt es ein breites Sortiment von Produkten mit fester oder cremiger Konsistenz, wie Puddings und Desserts, Produkte mit aufgeschlagener Konsistenz oder mit Toppings. Die Produktpalette wird sich in den nächsten Jahren noch vergrößern, wenn die aseptischen Abfülltechniken weiterentwickelt werden.

Im Jahre 1979 wurden etwa 40% der in der Bundesrepublik hergestellten Konsummilch in Form von H-Milch produziert. Dies waren ca. 128 000 t. Die Zahl der H-Milch produzierenden UHT-Anlagen beträgt ca. 90 bis 100 Stück. Davon arbeiten etwa 23 bis 25% nach dem direkten Verfahren und etwa 75 bis 77% nach dem indirekten Verfahren. In den letzten Jahren nahm der Anteil der direkt arbeitenden Anlagen aus Gründen des höheren Energieverbrauchs ab.

4.1. Anlagen mit indirekter Erhitzung

Als Anlagen mit indirekter Erhitzung bezeichnet man solche, in denen das Erwärmen und Abkühlen des Produktes indirekt durch Wärmeaustausch in Wärmeaustauschern von Produkt zu Produkt oder zwischen einem Wärmeträger (Wasser, Dampf) und dem Produkt erfolgt. Für den Wärmeaustausch werden Platten- oder Röhrenwärmeaustauscher verwendet. Die Temperaturänderungsgeschwindigkeit dT/dt beim Erhitzen und Abkühlen im Wärmeaustauscher ist geringer als bei den mit Dampfreaktion arbeitenden Anlagen mit direkter Erhitzung. Dies ergibt für die Anlagen mit indirekter Erhitzung eine im Bereich der Maximaltemperatur breitere Temperatur/Zeit-Kurve des Produktes, s. Abb. 2.

Die Temperaturänderungsgeschwindigkeit im Gut liegt aber wesentlich höher als beim Sterilisieren von Gut in Gläsern oder Dosen und beträgt je nach Anlagentyp zwischen 0,5 bis 3 K/s. (In einem Rotationssterilisator wird für Sterilmilch in Glasflaschen ein Wert von ca. 0,08 K/s erreicht.)

Die UHT-Anlagen sind mit Ausnahme weniger Teile Anlagen, die aus bewährten und in der Lebensmittelverarbeitung gebräuchlichen Elementen zusammengesetzt sind. Die wichtigsten Elemente der indirekten Anlagen sind: Wärmeaustauscher, Heißhalter, Umschaltventil, Homogenisiermaschine sowie Pumpen, Armaturen und Rohrleitungen.

Abb. 3 zeigt ein vereinfachtes Fließschema der Anlagen mit indirekter Erhitzung. Das Einsatzprodukt 1 wird aus einem Vorlaufbehälter 2 mittels einer Pumpe 3 durch einen oder

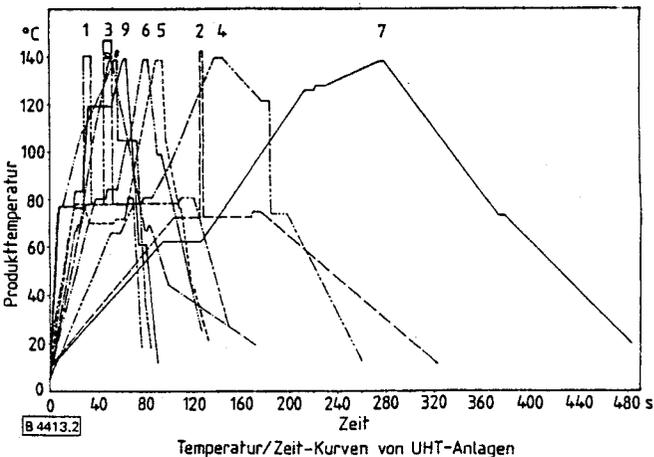


Abb. 2. Temperatur/Zeit-Kurven von UHT-Anlagen für das Erwärmen und Abkühlen von Milch. Die Zeit ist als mittlere Verweilzeit angegeben, nach [7].

1 bis 3 Anlagen mit direkter Erhitzung, 7 bis 10 Anlagen mit indirekter Erhitzung.

mehrere hintereinandergeschaltete Wärmeaustauscher 4 geführt und im Gegenstrom mit dem heißen und sterilen Produkt vorgewärmt. Im nachfolgenden Erhitzer 5 wird das Produkt auf eine Sterilisationstemperatur zwischen 135 und 150°C erhitzt. Werden Röhrenapparate verwendet, wird mit Sattedampf beheizt, dessen Temperatur nur 3 bis 8°C über der maximalen Produkttemperatur liegen soll. Diese geringe Temperaturdifferenz erfordert zwar eine größere Wärmeaustauschfläche, gewährleistet aber eine niedrige Wandtemperatur und damit größtmögliche Produktschonung. In Plattenapparaten kann die Erhitzungsabteilung mit Dampf oder einem Heißwasserkreislauf beheizt werden; letzterer arbeitet produktschonend und verbessert die Energiebilanz der Anlage.

Nach dem Erreichen der Maximaltemperatur wird das Produkt in einer Rohrstrecke 6 für 2 bis 8 s heißgehalten. Nach dem Heißhalten ist das Produkt steril und muß unter aseptischen und jede Reinfektion vermeidenden Bedingungen transportiert und behandelt werden. Nach dem Heißhalten wird das Produkt möglichst schnell abgekühlt (4) auf eine Temperatur, die für das Homogenisieren geeignet ist, z. B. zwischen 50 bis 75°C. Die aseptisch arbeitende Homogenisiermaschine 7 zerteilt mit einem Arbeitsdruck von 200 bis 300 bar die Fettphase der Milch zu Fettkügelchen solcher Feinheit, daß späteres Aufrahmen in der Packung unterbleibt. Der Restdruck der Homogenisiermaschine fördert das Produkt durch den 1. Teil des Wärmeaustauschers 4, in dem auf Abfülltemperatur gekühlt wird und der auch durch einen mit Kühlwasser betriebenen Apparat ergänzt werden kann, und durch eine Rohrleitung zu den Abfüllmaschinen. An den Abfüllmaschinen muß ein etwas höherer Volumenstrom zur Verfügung stehen, als abgenommen wird; der Überschuss von 5 bis 10% des sterilen Produktes fließt über eine Ringleitung in den Vorlaufbehälter zurück. Wird die geforderte Maximaltemperatur durch Störungen im System nicht erreicht, wird der gesamte Produktstrom über ein Umschaltventil 9 in den Vorlaufbehälter zurückgeführt. In gleicher Weise wird auch bei Störungen an den Abfüllmaschinen automatisch auf den Vorlaufbehälter umgeschaltet. Alles aus dem sterilen Teil der Anlage zurückgeflossene Produkt wird nochmals sterilisiert und damit einer zweifachen Wärmebelastung ausgesetzt. Um dieses zu vermeiden, kann zwischen Abfüllmaschinen und UHT-Anlage ein Steriltank eingeschaltet werden, der alles Produkt, das an der Abfüllmaschine nicht abgenommen werden kann, kurzzeitig speichert.

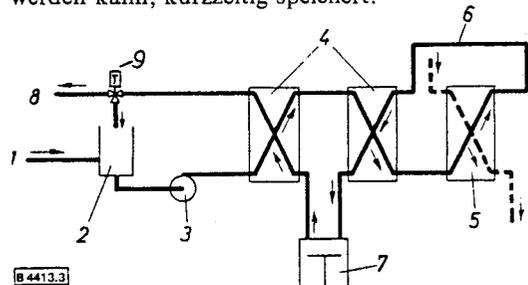


Abb. 3. Vereinfachtes Fließschema einer UHT-Anlage mit indirekter Erhitzung durch Wärmeaustausch.

1 Einsatzprodukt, 2 Vorlaufbehälter, 3 Pumpe, 4 Wärmeaustauscher zum Vorwärmen und Kühlen, 5 dampfbeheizter Erhitzer, bei Platten-Wärmeaustauschern Erhitzungsabteilung, 6 Heißhalterrohr, 7 Homogenisiermaschine, 8 sterilisiertes Produkt zum aseptischen Abpacken, 9 Umschaltventil.

4.1.1 Plattenwärmeaustauscher

Zum schnellen Erwärmen und Abkühlen von Produkten geringer Zähigkeit wie Milch oder Säften nimmt der

Plattenwärmeaustauscher einen unbestrittenen ersten Platz ein. Plattenwärmeaustauscher sind aus profilierten Stahlplatten in kompakter, raumsparender Bauweise zusammengesetzt. Die Platten haben eine rechteckige Form und werden am äußeren Rand und an den Durchtrittsöffnungen durch eingeklebte oder eingelegte Gummidichtungen gegeneinander abgedichtet.

In den letzten Jahren haben die Plattenwärmeaustauscher einen hohen Entwicklungsstand erreicht, und die Problematik besteht nicht mehr im Erreichen des angestrebten mikrobiologischen Effektes. Die gegenwärtige Entwicklung zielt mehr darauf, Prozesse und Apparate so zu verbessern, daß unerwünschte Qualitätseinbußen im Produkt verringert werden. Aus Erfahrungen der Praxis und den beim Prüfen von Milcherhitzern gewonnenen Erkenntnissen weiß man heute, daß die konstruktive Gestaltung des Apparates Auswirkungen auf die sensorische Beschaffenheit der Milch hat. Über sehr sporadische Beispiele hinaus sind die Vorgänge im Milcherhitzer unter diesem Gesichtspunkt aber noch wenig systematisch erforscht worden.

Neuere Arten der Plattenprägung führen zu einer höheren Turbulenz, einem besseren Wärmeübergang zwischen Platte und Flüssigkeit und einer gleichmäßigeren Strömung [8]. Die Plattenprägungen tendieren zum engen, aber weniger tiefen Wellenprofil mit zahlreichen Abstützpunkten zwischen den Platten, wie sie durch das sog. Fischgrätenmuster oder durch das unterbrochene Wellenmuster gegeben sind. Zwischen den einzelnen Herstellern ist eine Annäherung der Plattenprägungen festzustellen. Diese Entwicklung ist auch bedingt durch die Reduzierung der Plattendicke (0,6 bis 0,8 mm), die mehr Abstützpunkte und die Verwendung von Plattenwerkstoffen, wie Titan, mit geringerer Eignung zum Tiefziehen erforderlich macht.

Für sehr große Apparate kann das Zusammenpressen des Plattenpaketes durch eine hydrostatische Anpreßvorrichtung mit der Möglichkeit der hydraulischen Steuerung des Anpreßdruckes je nach Betriebsart erfolgen. Im allgemeinen erfolgt jedoch das Anpressen der Platten über Zugstangen oder eine Spindel und manuelles Verschrauben. Für beide Ausführungsformen lassen sich Vor- und Nachteile anführen. Die größten für UHT-Anlagen von Milch zur Zeit gebauten Plattenapparate haben ein Durchsatzvolumen von 20 000 l/h und Wärmeaustauschflächen von 0,5 m² pro Platte. Die entscheidenden Vorteile, die der Plattenapparat für dieses Produkt bietet, sind:

- Durch die Art des Plattenprofils werden hohe Turbulenz und gute Wärmeübergangskoeffizienten erreicht (für Milch oder ähnliche Produkte α -Werte von 5 800 bis 10 500 W/m²K).
- Das Produkt wird schnell auf die erforderliche Pasteurisierungstemperatur gebracht und schnell wieder abgekühlt.
- Dünne Plattendicken (0,6 bis 0,8 mm) bei Verwendung von nichtrostendem Stahl und neuerdings auch Titan ergeben einen geringen Wärmeleitwiderstand (für Milch oder ähnliche Produkte k -Werte von 2 900 bis 6 750 W/m²K).
- In Verbindung mit einem Röhrenheizhalter ergibt sich ein günstiges Verweilzeitverhalten.
- Die Apparate sind durch Einschalten in eine Kreislaufreinigung (CIP) leicht zu reinigen.
- Durch Öffnen des Plattenpaketes ist eine Inspektionsmöglichkeit gegeben.
- Die kompakte Bauweise ermöglicht Unterbringung einer großen Wärmedurchgangsfläche auf engstem Raum.
- Defekte Platten können leicht entdeckt und ersetzt werden.

– Schaltungsänderungen sind durch Hinzufügen oder Entfernen von Platten in begrenztem Umfang möglich.

Als Nachteile stehen demgegenüber:

- Plattenapparate sind durch die Plattenprägung und den Aufbau relativ teuer.
- Die Plattenpakete können nur einen geringen Überdruck (normal bis etwa 6 bar) aufnehmen und sind daher nur für Produkte geringer Viskosität einsetzbar.
- Plattenapparate sind relativ teuer in der Wartung. Dichtungen und auch die Platten müssen je nach mechanischer, thermischer und chemischer Beanspruchung ausgewechselt werden.

4.1.2 Röhrenwärmeaustauscher

Röhrenwärmeaustauscher können als Doppel- oder Dreirohrwärmeaustauscher ausgebildet sein, die aus Platzgründen in Form einer Spirale gewickelt sind. In neuerer Zeit werden auch Rohrbündelwärmeaustauscher mit Rohren von 15 mm Innendurchmesser, 3 m Länge und ca. 60 Rohren pro Bündel eingesetzt.

Röhrenwärmeaustauscher sind wesentlich höher durch Druck belastbar und erlauben daher höhere Strömungsgeschwindigkeiten und auch höhere Druckverluste.

Dadurch sind wesentlich turbulenterer Strömungszustände möglich, welche der Neigung zur Bildung von Ansätzen im heißen Teil entgegenwirken und die Standzeit der Apparate erhöhen. Wegen der möglichen höheren Druckbelastung sind Anlagen mit Röhrenwärmeaustauschern auch für Produkte mit etwas höherer Viskosität, wie z. B. Kakaomilch, Sahne, Suppen, Puddings, Desserts etc., geeigneter als Anlagen mit Plattenapparaten, obwohl diese heute auch mit Plattenapparaten hergestellt werden.

Röhrenwärmeaustauscher sind gegenüber den Plattenapparaten wartungsfreundlicher, da die eingeklebten Dichtungen entfallen. Nachteilig für Röhrenwärmeaustauscher ist, daß Durchbrüche, z. B. Haarrisse, in der Austauschfläche nur sehr aufwendig festgestellt werden können. Bei Beschädigungen muß die gesamte Spirale oder das gesamte Bündel ausgewechselt werden. An Rohrspiralen ist eine Kontrolle auf ausreichendes Reinigen oder ein Nachreinigen von Hand unmöglich.

4.1.3 Ablagerungen

Eine sehr wesentliche Erscheinung in allen UHT-Anlagen ist die Bildung von Ablagerungen aus dem Produkt heraus auf den Wärmeaustauschflächen. Die Ablagerungen entstehen bei Milch durch eine Denaturierung der wenig temperaturbeständigen Molkenproteine. Das Auftreten von Ablagerungen ist in allen Wärmeaustauschertypen, also auch in Röhrenwärmeaustauschern, ja selbst in den nichtbeheizten Fließquerschnitten, wie im Heizhalterrohr, in Ventilen und Rohrstrecken festzustellen. In Plattenwärmeaustauschern sind Ausbreitung und Stärke der Ablagerungen naturgemäß am leichtesten zu beobachten [9]. Diese Bildung von Ablagerungen in den heißen Teilen der UHT-Anlagen sind unter mehreren Gesichtspunkten bedeutsam:

- Die Ablagerungen haben nachteilige sensorische Auswirkungen auf das Endprodukt.
- Infolge der Ablagerungen verengt sich der Fließwegquerschnitt, und der Druckverlust steigt stark an. Dies wirkt sich besonders in den engen Strömungskanälen der Plattenwärmeaustauscher stark aus.
- In dem mit Dampf oder Heißwasser beheizten Erhitzerteil der UHT-Anlagen wird durch die Belegung der Wärmeaustauschflächen in dem schlecht wärmeleitenden Belag

der Wärmedurchgang behindert. Um die gewünschte Endtemperatur im Produkt einzuhalten, muß die Temperatur des Wärmeträgers stetig erhöht werden. Diese Temperaturerhöhung begünstigt aber wieder die schnelle Bildung von Ablagerungen. Schließlich muß die Anlage abgestellt und gereinigt werden.

Die gegenwärtigen Bemühungen der Anlagenbauer sind darauf gerichtet, Anlagen und Verfahrensweise so zu verbessern, daß möglichst lange Standzeiten – je nach Bauart der Anlage und Beschaffenheit des Produktes zwischen 6 bis 20 Betriebsstunden – bei möglichst geringer Qualitätseinbuße des Produktes erreicht werden.

4.1.4 Homogenisiermaschine

In den UHT-Prozeß integriert ist für alle homogenen Produkte eine Homogenisiermaschine. Das Produkt wird aus zwei Gründen homogenisiert:

- Um bei fetthaltigen Milchprodukten die Milchfettkügelchen zu zerteilen, um ein Aufrahmen während der Lagerzeit zu verhindern;
- Um Protein-Aggregate, die sich durch Protein-Denaturierung während des Erhitzens gebildet haben können, zu zerteilen.

Das Homogenisieren kann vor oder nach der UHT-Erhitzung stattfinden. Im ersten Fall kann eine Homogenisiermaschine normaler Ausführung verwendet werden. Im zweiten Fall muß eine Sonderausführung, die für aseptisches Arbeiten gebaut und entsprechend teuer ist, eingesetzt werden. Ein Homogenisieren der erhitzten Milch bietet jedoch den Vorteil, daß gebildete Protein-Aggregate wieder zerteilt werden und dadurch eine unerwünschte Sedimentbildung in der Milch verhindert wird.

4.1.5 Umschaltventil

Das Umschaltventil hat die Funktion, den Produktfluß bei Nichterreichen der geforderten Maximaltemperatur sowie bei Störungen an der Anlage oder an den Abfüllmaschinen umzuschalten und wieder in den Vorlaufbehälter zurückzuleiten. Da es im sterilen Bereich installiert ist, muß es für eine aseptische Arbeitsweise gebaut sein. Wegen der hohen, bis 150°C erreichenden Temperaturen und des Angriffs der heißen Reinigungslösungen sind die Dichtungsmaterialien dieses Elementes besonders reparaturanfällig; sie verlieren schnell ihre Elastizität, werden brüchig und müssen ausgetauscht werden (u. U. alle 6 Wochen).

4.1.6 Desinfizieren

Nach jedem Reinigen oder Stillstehen muß die Anlage vor der Produktionsphase desinfiziert werden. Hierbei wird die Anlage mit heißem Wasser von 120 bis 150°C eine gewisse Zeit lang im Kreislauf gefahren. Dann wird von Wasser auf Produkt umgeschaltet.

4.2 Anlagen mit direkter Erhitzung

Als Anlagen mit direkter Erhitzung bezeichnet man solche, in denen das Erwärmen durch einen direkten Kontakt zwischen Produkt und einem Heizmedium erfolgt; da ein Vermischen der beiden Medien eintritt, kommt für Lebensmittel als Heizmittel nur Dampf in Frage. Für die Ausführung ergeben sich zwei Alternativen:

- Dampfinjektion. Der Dampf wird über eine Düse dem Produkt zugesetzt, und beide Phasen werden gut vermischt.
- Rieselfilmerhitzer. Das Produkt rieselt als frei fallender Film durch einen dampferfüllten Raum.

Beide Möglichkeiten der Erhitzung werden technisch ausgeführt.

Es ist selbstverständlich, daß an die Qualität des Dampfes erhebliche Anforderungen gestellt werden. Der Dampf muß aus Wasser von Trinkwasserqualität hergestellt werden und darf keine verunreinigenden Stoffe enthalten. Das bedeutet im allgemeinen, daß der Dampf nicht direkt aus dem Netz entnommen werden kann, sondern in einem Dampfumformer aus nichtrostendem Stahl separat erzeugt werden muß. Die Abb. 4 zeigt ein vereinfachtes Fließbild der Anlagen mit

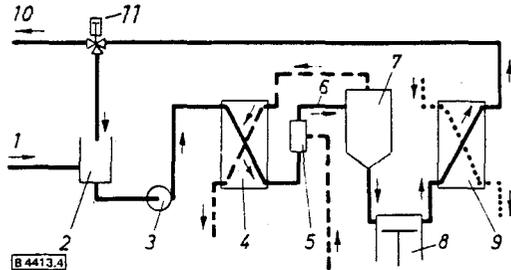


Abb. 4. Vereinfachtes Fließschema einer UHT-Anlage mit direkter Erhitzung durch Dampfinjektion.

1 Einsatzprodukt, 2 Vorlaufbehälter, 3 Pumpe, 4 Wärmeaustauscher zum Vorwärmen mit Brüden, 5 Dampfinjektor, 6 Heißhalterrohr, 7 Entspannungsverdampfer, 8 Homogenisiermaschine, 9 Wärmeaustauscher zum Kühlen (mit Wasser oder Einsatzprodukt), 10 sterilisiertes Produkt zum aseptischen Abpacken, 11 Umschaltventil.

direkter Erhitzung. Sie sind ähnlich aufgebaut wie die Anlagen mit indirekter Erhitzung. Das Vorwärmen des Produktes bis auf eine Temperatur von 80 bis 100°C erfolgt im Wärmeaustausch über Platten- oder Röhrenwärmeaustauscher 4. Durch wesentlich turbulenteren Strömungszustände in den Röhrenwärmeaustauschern, die durch höheren Druckverlust gegenüber Plattenapparaten möglich sind, soll die Bildung von Ansätzen vermindert und die Standzeit der Apparate erhöht werden. Nach dem Vorwärmen und einer eventuell eingeschobenen kurzen Vorheißhaltezeit wird das Produkt durch Injektion von Sattdampf (5) in extrem kurzer Zeit auf die gewünschte Maximaltemperatur gebracht.

Der Dampfinjektor ist ein kritisches Element der Anlagen. Er muß eine gute Mischung der beiden Phasen Produkt und Dampf bewirken, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung während der äußerst kurzen Zeit des Temperaturanstiegs zu gewährleisten. Er ist auch ein kritisches Element wegen der Bildung von Ansätzen, welche die Mischung der beiden Phasen beeinträchtigen. Dampfinjektoren gibt es in unterschiedlichen Ausführungsformen [10].

Nach Erreichen einer gleichmäßigen Maximaltemperatur schließt sich eine Rohrstrecke 6 an, die eine kurze Heißhaltezeit von 2 bis 6 s gewährleistet. Nach dem Heißhalter wird über eine Entspannungsverdampfung 7 das Produkt in ähnlich kurzer Zeit wie beim Erwärmen wieder abgekühlt, indem gleichzeitig das über den Dampf zugesetzte Wasser entzogen wird. Durch das Entspannen werden mit dem Wasser auch unerwünschte und leichtflüchtige Geruchs- und Geschmacksstoffe, die durch das Erhitzen entstanden sind, ausgedampft.

Ein plötzliches Entspannen des Produktes auf einen Druck unterhalb des Atmosphärendruckes hat ein Überhitzen der Flüssigkeit zur Folge, die ein spontanes Verdampfen eines Teiles des Wassers und Abkühlen auf die dem abgesenkten Druck entsprechende Gleichgewichtstemperatur bewirkt. Um die durch den Dampfzusatz eingetragene Wassermenge aus dem Wärme-Inhalt der Flüssigkeit heraus wieder zu verdampfen, genügt theoretisch eine Expansion auf eine dem

Druck zugehörige Gleichgewichtstemperatur, die 4 bis 6°C über der Temperatur der Flüssigkeit vor der Dampfinjektion liegt. Wegen der Wärmeverluste von der Dampfinjektion bis zur Entspannung, die in ihrer Höhe systemabhängig sind, beträgt dieser Temperaturunterschied jedoch nur 1 bis 2°C. Im unteren Teil des Entspannungsgefäßes befindet sich ein Niveauregler, der einen gleichmäßigen Flüssigkeitsstand im Behälter gewährleistet.

Die Brüden aus dem Entspannungsgefäß können zum Vorwärmen des Einsatzproduktes im Vorwärmer 4 ausgenutzt werden. Nach dem Homogenisieren (8) wird im Wärmeaustausch mit Kühlwasser das Produkt auf die Abfülltemperatur heruntergekühlt. Die Möglichkeit der Wärmeausnutzung und -rückgewinnung ist dadurch beim direkten Erhitzen nicht so günstig wie beim indirekten.

Abb. 2 zeigt die für das momentane Erhitzen und Abkühlen typische stufenförmige Temperatur/Zeit-Kurven der Anlagen mit direkter Erhitzung. Die Temperaturänderungsgeschwindigkeit beträgt 100 bis 150 K/s und nimmt damit Werte an, die mit keinem anderen Sterilisationsverfahren erreicht werden. Der schnellste Dosensterilisator, der Flammensterilisator, erreicht im unteren Erwärmungsbereich eine Temperaturänderungsgeschwindigkeit von 1 K/s.

Sämtliche in der Bundesrepublik für H-Milch betriebenen Anlagen mit direkter Erhitzung arbeiten mit Dampfinjektion. Der Rieselfilmerhitzer hat sich für Produkte mit niedriger Viskosität, vermutlich wegen des größeren baulichen Aufwandes und eines ungünstigeren Verweilzeitverhaltens während des Aufheizens, noch nicht durchgesetzt. Derzeit wird eine Anlage für Milch probeweise in Norditalien betrieben.

Der UHT-Prozeß kann auch mit Produkten höherer Viskosität, wie Suppen, Saucen etc., durchgeführt werden. Wegen der höheren Druckverluste erfolgt das Vorwärmen und Abkühlen in Röhrenwärmeaustauschern. Für das Erhitzen auf die Sterilisationstemperatur eignen sich ebenfalls Rohrsysteme, Rohrbündel- oder Doppelrohrwärmeaustauscher. Für hochviskose Produkte werden Apparate vom Typ des Kratzwärmeaustauschers für das Erhitzen eingesetzt. Schnelleres und schonenderes Erhitzen wird durch direktes Erwärmen des durch einen Dampfraum frei fallenden Produktes in Apparaten vom Typ Rieselfilmerhitzer in Kombination mit einem Entspannungsverdampfer und Nachkühlen über Kratzwärmeaustauscher ermöglicht.

4.3 Vergleich der beiden Verfahren

Anlagen mit indirekter Erhitzung haben den Vorteil der größeren Betriebssicherheit und vermeiden die Probleme, die beim direkten Verfahren durch die an den Injektionsdampf gestellten Qualitätsanforderungen entstehen. Mit den Verfahren mit indirekter Erhitzung ist durch Vergrößerung der Wärmeaustauschfläche ein Wärme-Rückgewinn von 70 bis 90% möglich, während in direkt arbeitenden Anlagen nur etwa 50% und bei Ausnutzung der Kondensationswärme der Brüden aus der Entspannungsverdampfung bis zu 60% der zum Aufheizen des Produktes benötigten Wärme zurückgewonnen werden können. Für Anlagen mit großem Durchsatz wird der Prozentsatz des Wärme-Rückgewinns zu einem immer wichtiger werdenden Entscheidungsgrund bei der Auswahl einer Anlage. Mit einer qualitativ guten Ausgangsmilch läßt sich in einer indirekten Anlage mit günstigem Temperatur/Zeit-Verhalten eine ernährungsphysiologisch und sensorisch als gut zu bewertende H-Milch herstellen.

Die Anlagen mit direkter Erhitzung erbringen durch das Fehlen von Wärmeaustauschflächen in der Endphase der Erhitzung und während der Entspannungsverdampfung

längere Standzeiten, bis ein Reinigen zum Entfernen der Beläge nötig wird. Kritische Stellen, die zur Ansatzbildung neigen, gibt es hier jedoch auch. Es sind dies insbesondere der Dampfinjektor, die Heißhaltestrecke und die Eintrittsstelle in das Entspannungsgefäß. Der Vorteil einer längeren Betriebsperiode bis zum erforderlichen Reinigen der Anlage wirkt sich weniger bei einer qualitativ guten Rohmilch aus, mehr dagegen bei einer schlechten bakteriologischen Qualität der Rohmilch, wie sie meist in wärmeren Ländern anzutreffen ist. Der Vorteil einer Qualitätsverbesserung, der durch das äußerst kurzzeitige und ohne Wärmeübertragungsfläche erfolgende Erwärmen und Abkühlen normalerweise gegeben ist, macht sich bei Milch nicht so signifikant bemerkbar, da die sensorische Qualität der H-Milch noch durch andere komplexe Zusammenhänge beeinflusst wird. Probleme für das Betreiben können sich durch die hohen Qualitätsanforderungen ergeben, die an den zugesetzten Dampf gestellt werden.

Wartungsintensiv sind vor allem die Dichtungen im heißen Teil der Anlage. Das sind insbesondere die Dichtungen der Plattenwärmeaustauscher und die Dichtungen der Umschaltventile. Dichtungen im Temperaturbereich über 120°C haben teilweise eine Lebensdauer von nur 2 Monaten. Bisher konnten noch keine besseren Dichtungsmaterialien entwickelt werden, die den lebensmittelrechtlichen Anforderungen genügen sowie genügend elastisch und widerstandsfähig gegen hohe Temperaturen sind. Ein ähnliches Problem bilden die Kleber zum Einkleben der Dichtungen in die Platten der Plattenwärmeaustauscher. Eine Verbesserung bildet eine Plattenkonstruktion, bei der die Dichtungen nicht mehr geklebt, sondern in eine selbsthaltende Nut eingelegt werden. Anlagen mit Röhrenwärmeaustauschern vermeiden diese Schwierigkeiten, haben im Falle von Doppelrohrwärmeaustauschern jedoch den Nachteil, daß die Wärmeaustauschflächen nicht inspiziert werden können. Systeme mit direkter Erhitzung, die ohne Wärmeaustauscher im oberen kritischen Temperaturbereich auskommen, sind in dieser Hinsicht günstiger.

Die Entwicklung der UHT-Anlagen tendiert zu vormontierten, wenig wartungsintensiven Anlagen in Modularbauweise mit höherer Durchsatzleistung und längeren Standzeiten bis zu einer durch Ansatzbildung notwendigen Reinigung. Anlagen mit Plattenwärmeaustauschern werden heute mit bis zu 16 000 l/h, in Zukunft aber auch bis 25 000 und 33 000 l/h, solche mit Röhrenwärmeaustauschern bis 20 000 l/h gebaut. Die Standzeiten der indirekt arbeitenden Anlagen mit Plattenwärmeaustauschern liegen je nach Beschaffenheit der Ausgangsmilch zwischen 6 und 12 h und benötigen vielleicht auch eine Zwischenreinigung. Anlagen nach dem direkten Verfahren oder mit Röhrenwärmeaustauschern können Standzeiten von 20 h erreichen. Die längeren Standzeiten dürfen jedoch nicht durch niedrige Strömungsgeschwindigkeiten in weiten Fließwegquerschnitten erreicht werden, was zu einer Streckung des Zeit/Temperatur-Diagrammes, Übersterilisation und qualitativer Abwertung der H-Milch führt. Die Entwicklung sollte aber zu Anlagen führen, die nur geringe Produktschädigung bewirken.

5 Optimierung

Eine Optimierung der Anlagen kann unter sehr unterschiedlichen Zielvorstellungen – Investitionskosten, Energie- und Betriebskosten, Produktqualität – vorgenommen werden. Die in der Lebensmittelverarbeitung wichtigste Zielvorstellung sollte eine gute Produktqualität sein, die vorrangig durch die Temperatur/Zeit-Kurve einer Anlage bestimmt wird.

Tabelle 1.

 F_m -, F_c -, F_e - und S_H -Werte der UHT-Anlagen nach Abb. 2 für Nennvolumenstrom.

Art der Anlage	Nr. der Anlage	maximale Temperatur	Heißhaltezeit	F_m -Wert, bezogen auf 133,4°C	F_m -Wert, bezogen auf 121,1°C	F_c -Wert, bezogen auf 140°C	F_c -Wert, bezogen auf 127°C	S_H -Wert, bezogen auf 128°C
		ϑ_{\max} [°C]	t [s]	$F_{m133,4}^{10,8}$ [s]	$F_{m121,1}^{10,8}$ [min]	F_{e140}^{32} [s]	F_{c127}^{30} [s]	S_{H128}^{24} [s]
direkt	1	140,5	5,6	25	5,8	5,8	16	19
	2	142	2,4	15	3,4	2,8	7,6	9,2
	3	147 (145)	6,7 (3,0)	122 (36)	28 (8,2)	11 (4,3)	31 (12)	41 (15)
indirekt	4	139,5	6,5	70	16	37	96	97
	5	138,5	5,2	22	5,1	11	28	28
	6	139	3,4	20	4,5	10	26	26
	7	138	4,0	85	20	61	156	152
	8	139	1,7	19	4,5	14	35	33
	9	139,5	2,2	20	4,6	14	35	33
	10	138,5	2,6	19	4,3	12	30	29
				$F_{m,unt} = 15$	$F_{e,unt} = 2,8$		$F_{c,ob} = 35$	$S_{H,ob} = 33$

Wie Abb. 2 zeigt, sind die Temperatur/Zeit-Kurven der einzelnen Anlagen sehr unterschiedlich und unterscheiden sich hinsichtlich der Dauer der mittleren Verweilzeiten in den einzelnen Heißhaltestufen des Produktes, in den maximalen Temperaturen und in den Temperaturgradienten der Erhitzungs- oder Abkühlphasen. Dieses sehr differenzierte Temperatur/Zeit-Verhalten der Anlagen hat unterschiedlich große Abbauraten für mikrobiologische und chemische Abbaureaktionen zur Folge und wirkt sich in analoger Weise auf die Neubildung unerwünschter Stoffe aus.

Zur Beurteilung der thermischen Wirksamkeit eines Sterilisationsprozesses dienen die in der Konserventechnik bewährten und als F -Werte bekannten Sterilisationswerte:

$$F = \int 10^{\frac{\vartheta - \vartheta_B}{z}} dt \quad (6)$$

Die Berechnung der F -Werte ist für die UHT-Anlagen wegen ihrer angenähert linear verlaufenden Temperatur/Zeit-Kurven einfach durchzuführen [11] und erfordert nur die Kenntnis des z -Wertes und der Temperatur/Zeit-Kurve des Produktes.

Die Temperatur/Zeit-Kurven der Abb. 2 beziehen sich auf eine berechnete mittlere Verweilzeit. Die im System auftretende Verweilzeitstreuung, die jedoch nach unseren Messungen gering ist, wird nicht berücksichtigt. Die Kurven ändern sich zu längeren mittleren Verweilzeiten hin, wenn die Anlagen mit geringerem als Nennvolumenstrom betrieben werden. Die Unsicherheiten, die einer Berechnung des Sterilisationseffektes der UHT-Anlagen bisher entgegenstanden und teilweise auch noch bestehen, liegen in der mangelnden Kenntnis der geeigneten reaktionskinetischen Größen z und D , die man für die Berechnung der F -Werte benötigt.

In der Literatur wurden in den letzten Jahren Zweifel darüber geäußert, ob sich der in der Konservenindustrie für Sterilisationsvorgänge in einem engen Bereich um 121°C eingeführte F -Wert auch für den höheren und weiteren Temperaturbereich der UHT-Verfahren anwenden läßt. Durch eine reaktionskinetische Betrachtung und bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen ist nachweisbar, daß der F -Wert auch für den Temperaturbereich der UHT-Verfahren anwendbar ist. Die Voraussetzung, eine linear über den Temperaturbereich verlaufende Abbaukurve $\lg D = f(T)$ und damit ein im betrachteten Temperaturbereich konstanter z -Wert, kann für Sporenbildner, Enzyme und einige chemische Inhaltsstoffe

durch Untersuchungen anderer Autoren [12–14] und eigene Versuche als zutreffend gelten [15, 17, 19].

5.1 Abtötung von Mikroorganismen

Als Richtkeim für die Abtötung von Mikroorganismen wurde *B. stearothermophilus* gewählt, der als thermisch resistenteste Sporenart in H-Milch angesehen werden kann. Für die reaktionskinetischen Größen D und z wurde eine Abtötungskurve zugrundegelegt, die in umfangreichen eigenen Versuchen mit einer direkt arbeitenden UHT-Kleinanlage erhalten wurde [15] und im Temperaturbereich von 125 bis 150°C einen konstanten Wert von $z = 10,75^\circ\text{C}$ aufweist. Als geeignete Bezugstemperatur wurde $\vartheta_B = 133,4^\circ\text{C}$ mit $D = 1$ min für eine Sporenreduktion um den Faktor 10^{-9} gewählt. In Tab. 1, Spalte 5, sind für die 10 UHT-Anlagen, deren Temperatur/Zeit-Kurven in der Abb. 2 dargestellt sind, die F_m -Werte als $F_{m133,4}^{10,8}$ (bezogen auf 133,4°C und mit $z = 10,8^\circ\text{C}$) in der Zeiteinheit s zusammengestellt. Bei der Betrachtung der F_m -Werte, die proportional dem mit der Anlage erreichten Letaleffekt sind, fällt auf, daß die Werte der einzelnen Anlagen sehr streuen. Sie reichen von 15 s (Anlage 2) bis 85 s (Anlage 7) oder sogar 122 s (Anlage 3).

Die direkt arbeitenden Anlagen weisen F -Werte in gleicher Höhe auf wie die indirekten Anlagen. Anlage 3 fällt durch einen sehr hohen F_m -Wert auf, bedingt durch die hohe Temperatur von 147°C und die relativ lange Heißhaltezeit von 6,7 s. Die Anlage 3 wurde nicht nur für H-Milch, sondern auch noch für andere Produkte ausgelegt. Für eine reine H-Milch-Herstellung könnte die Anlage 3 mit erniedrigter Temperatur und verkürzter Heißhaltezeit betrieben werden und würde dann einen entsprechend niedrigeren F_m -Wert aufweisen (Werte in Klammern).

In der Bundesrepublik Deutschland muß ultrahocherhitzte Milch, H-Milch, in ungeöffneten Packungen bei Zimmertemperatur mindestens 6 Wochen haltbar sein. Da nur eine Haltbarkeit von 6 Wochen verlangt wird, muß kein vollständig steriles Produkt vorliegen, es genügt eine dieses gewährleistende kommerzielle Sterilität. In der Typprüfung der Anlagen wird auch die Haltbarkeit der hergestellten Milch geprüft. Alle in Tab. 1 aufgeführten Anlagen haben mit den in Spalte 3 und 4 aufgeführten maximalen Temperaturen und Heißhaltezeiten die Haltbarkeitsforderung erfüllt. Den untersten F_m -Wert, mit dem die geforderte Haltbarkeit von 6 Wochen erreicht wurde, weist Anlage 2 mit $F_{m133,4}^{10,8} = 15$ s

bzw. nach Spalte 6 – hier sind die F_m -Werte auf eine Bezugstemperatur von $121,1^\circ\text{C}$ umgerechnet und damit dem in der Konservenindustrie angewendeten F_0 -Wert, berechnet mit $121,1^\circ\text{C}$ und $z = 10$, vergleichbar – mit $F_{m121}^{10,8} = 3,4$ min auf.

5.2 Enzym-Inaktivierung

Zur Charakterisierung der Inaktivierung von Enzymen während der UHT-Behandlung dient der F_c -Wert, der mit den reaktionskinetischen Daten des Enzym-Abbaus berechnet wird. Der Berechnung zugrunde gelegt wurde eine Kurve für 90proz. Inaktivierung der Proteasen von *Pseudomonas* in Milch mit einem D -Wert von $D = 60$ s für 140°C und $z = 32^\circ\text{C}$, die der Literatur entnommen wurde [16].

Die Enzym-Inaktivierung verläuft mit niedriger Aktivierungsenergie und sich daraus ergebenden niedrigen Q_{10} -Werten bzw. hohen z -Werten. Die Q_{10} - bzw. z -Werte für die Enzym-Inaktivierung liegen in der Nähe der Werte für chemische Veränderungen. Enzyme werden daher ähnlich wie chemische Abbauvorgänge weniger durch hohe Temperaturen und kurze Zeiten, sondern mehr durch Kombination von niedrigen Temperaturen mit längeren Zeiten geschädigt. Daraus ergibt sich die Folgerung, daß der UHT-Prozeß nicht zur vollständigen Inaktivierung der Enzyme führen muß, insbesondere dann nicht, wenn ein hoher Enzym-Gehalt in der Ausgangsmilch vorliegt.

Bei einem Vergleich der mit $z = 32$ berechneten und auf 140°C bezogenen F_c -Werte der 12 Anlagen nach Spalte 7 der Tab. 1 fallen die direkt arbeitenden Anlagen auf, die entsprechend den reaktionskinetischen Zusammenhängen sehr niedrige F_c -Werte aufweisen. Von den indirekt arbeitenden Anlagen fallen die Anlagen Nr. 4 und 7 durch hohe F_c -Werte auf. Beide Anlagen weisen nach Abb. 2 im Bereich der oberen Temperaturen eine sehr weit gespreizte Temperatur/Zeit-Kurve auf. Erwünscht sind auch hier möglichst hohe F_c -Werte. Der unterste, von der Anlage 2 erreichte F_c -Wert beträgt $F_c = 2,8$ s; 9 der 12 Anlagen weisen F_c -Werte unterhalb von 14 s auf. Bereits für eine 90proz. Enzym-Reduktion ist ein F_c -Wert von 60 s erforderlich, der von einer Anlage erreicht wird.

5.3 Chemische Veränderungen

Die für die Abtötung von Mikroorganismen und die Enzym-Inaktivierung angewendete Rechenmethode läßt sich in analoger Weise auch auf die Betrachtung von chemischen Veränderungen im Produkt übertragen. Geeignete Reaktionen, für die man das Zeitgesetz in einer für die Berechnung brauchbaren Form aufstellen kann, sind der Abbau von Vitamin B_1 und die Bildung von Reaktionsprodukten. Als solches kann 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) dienen, das als Zwischenprodukt der Maillard-Reaktion gebildet wird. Die beiden unterschiedlichen Vorgänge, einmal des Abbaues von Stoffen und zum anderen der Bildung von Reaktionsprodukten, erfordern eine entsprechende Modifizierung der mathematischen Methode.

Für chemische Abbauvorgänge benötigt man zur Charakterisierung der thermischen Resistenz des betrachteten Stoffes lediglich wiederum seinen z -Wert und kann unter der Voraussetzung, daß der z -Wert im betrachteten Temperaturbereich konstant ist, einen F_c -Wert ansetzen.

Der Berechnung zugrundegelegt wird eine Kurve für 15proz. Vitamin- B_1 -Abbau in Vollmilch, die für die UHT-Erhitzung gemessen und aus der ein z -Wert von $z = 30^\circ\text{C}$ und eine Bezugstemperatur $\vartheta_B = 127^\circ\text{C}$ entnommen wurde [17].

Anzustreben sind möglichst niedrige F_c -Werte. Beim Ver-

gleich der F_c -Werte nach Spalte 8 der Tab. 1 zeigt sich, wie schon bei den F_c -Werten, die mit etwa gleichem z berechnet wurden, daß die direkt arbeitenden Anlagen die niedrigsten Werte aufweisen, damit also den geringsten Vitamin- B_1 -Abbau ergeben. Die beiden Anlagen Nr. 4 und 7 fallen wieder durch sehr hohe Werte heraus. Die Mehrzahl der Anlagen weist F_c -Werte unterhalb von 35 s auf. Ein oberer F_c -Wert von $F_{c,ob} = 35$ s braucht daher nicht überschritten zu werden. Ein sehr guter, vielleicht sogar der beste chemische Parameter zur Beurteilung des UHT-Verfahrens ist das HMF, das sich als Zwischenprodukt der Maillard-Reaktion bildet. In analoger Weise wie für die Sterilisationswerte, die Abbauvorgänge charakterisieren, läßt sich ein aus Gl. (5) abgeleiteter S_H -Wert als Sterilisationswert aufstellen, der die Bildung von Reaktionsprodukten, in diesem Falle HMF, charakterisiert [18]:

$$S_H = \int 10^{\frac{\vartheta - \vartheta_B}{z}} dt. \quad (7)$$

Die Berechnung der S_H -Werte basiert auf der Kenntnis des Zeitgesetzes der Bildung von HMF in Vollmilch und der Bildungskurve, die erstmalig aufgestellt werden konnte [19]. Aus der Bildungskurve wurde ein z -Wert von $z = 23,7^\circ\text{C}$ und eine Bezugstemperatur $\vartheta_B = 128^\circ\text{C}$ entnommen. Der z -Wert für die HMF-Bildung liegt damit in der Größe der entsprechenden Werte für chemische Abbaureaktionen.

Da HMF ein unerwünschtes Reaktionsprodukt darstellt, soll die während der Wärmebehandlung absolut gebildete HMF-Menge gering und dementsprechend auch der S_H -Wert, welcher der absolut gebildeten HMF-Menge proportional ist, möglichst niedrig sein.

In Spalte 9 der Tab. 1 sind die S_{H128}^{24} -Werte der untersuchten Anlagen aufgeführt. Die Relation der S_H -Werte der einzelnen Anlagen zeigt ein ähnliches Bild wie für die F_c -Werte, da F_c - und S_H -Werte mit nahe beieinander liegenden z -Werten berechnet wurden. Die drei direkt arbeitenden Anlagen weisen die niedrigsten Werte auf. Die S_H -Werte der indirekt arbeitenden Anlagen liegen, wie von der Theorie zu erwarten, höher. Die Anlagen Nr. 4 und 7 ergeben wegen ihrer in der Zeitachse gestreckten Temperatur/Zeit-Kurven die höchsten S_H -Werte. Die Mehrzahl der Anlagen überschreitet S_H -Werte von 30 s nicht. Ähnlich wie für den z -Wert kann man einen oberen S_H -Wert von $S_{H,ob} = 30$ s festlegen, den eine Anlage bei der Herstellung von H-Milch unter normalen Betriebsbedingungen nicht überschreiten sollte.

Mit Hilfe derartiger Sterilisationswerte ist es möglich, eine UHT-Anlage genau nach den Erfordernissen des Produktes auszulegen. Für Milch mit einer nur begrenzten und relativ kurzen Haltbarkeitszeit von 6 Wochen wird man eine ausreichende Mikroorganismen-Abtötung, aber eine sonst nur geringe thermische Schädigung mit niedrigen F_c und S_H -Werten anstreben. In wärmeren Ländern oder für eine Haltbarkeitszeit von 12 Wochen oder länger muß durch eine weitgehende Sporenabtötung durch einen hohen F_m -Wert und durch einen hohen F_c -Wert eine ebensolche Enzym-Inaktivierung erreicht werden; letzteres allerdings bewirkt zwangsläufig eine ebenso starke thermische Schädigung des Produktes.

Eingegangen am 2. Februar 1981 [B 4413]

Formelzeichen

N	Menge des reagierenden Merkmals
N_0	Ausgangsmenge
$k_{(T)}$	temperaturabhängige Geschwindigkeitskonstante
t	Zeit

A Faktor der Arrhenius-Gleichung
 E Aktivierungsenergie
 R universelle Gaskonstante
 T Temperatur (K)
 z z-Wert (Temperaturkoeffizient)
 D_B D-Wert (Dezimalreduktionszeit)
 θ_B Bezugstemperatur (°C)
 θ Temperatur (°C)
 F_m F-Wert für die Mikroorganismen-Abtötung
 F_e F-Wert für die Enzyminaktivierung
 F_c F-Wert für chemische Abbauvorgänge
 S_H S_H-Wert für Bildungsreaktionen

- [6] Wälzholz, G.; Lang, R.; Lembke, A.; Wasserfall, F.: Kieler Milchwirtsch. Forsch.-Ber. 14 (1962) S. 23/44.
 [7] Reuter, H.: Milchwiss. 35 (1980) S. 536/540.
 [8] Ladwig, H.-P.; Reuter, H.: Chem.-Ing.-Tech. 52 (1980) S. 273.
 [9] Reuter, H., et al.: 6th European Symposium Food, Engineering and Food Quality, Cambridge, Sept. 8. – 10., 1975, Proceedings S. 215/235.
 [10] Rabich, A.: Ernährungswirtsch./Lebensmitteltech. 5 (1973) S. 498/519.
 [11] Reuter, H.: Dtsch. Molk.-Ztg. 101 (1980) S. 1616/1625 u. 1701/1703.
 [12] Busta, F.: Appl. Microbiol. 15 (1967) S. 640/645.
 [13] Oquendo, R.: Lebensm.-Wiss. Technol. 8 (1975) S. 181/182.
 [14] Horak, F., P.: Dissertation, TU München 1980.
 [15] Konietzko, M.; Reuter, H.: Milchwissenschaft 35 (1980) S. 274/275.
 [16] Cerf, O.: International Dairy Federation, Report B-Doc. 76, Brüssel 1979.
 [17] Bayoumi, E.-S.; Reuter, H.: Milchwissenschaft 35 (1980) S. 278/279.
 [18] Reuter, H.: Dtsch. Molk.-Ztg. 101 (1980) S. 362/370.
 [19] Konietzko, M.; Reuter, H.: Milchwissenschaft 35 (1980) S. 276/277.

Literatur

- [1] Ball, C. O.: Bull. Nat. Res. Council 7, Part 1, No 37 (1923) S. 76.
 [2] Herrmann, J.: Lebensm.-Ind. 23 (1976) S. 399/406; 469/474; 515/522; 537/544.
 [3] Orla-Jensen: Die Bakteriologie in der Milchwirtschaft, Gustav Fischer, Jena 1913.
 [4] Procter, F.: J. Soc. Dairy Technol. 4 (1951) S. 107.
 [5] Mohler, H.: Chimica 6 (1952) S. 212/217.

Sonderverfahren der Beseitigung industrieller Abfälle – ihre Auswirkungen und Entwicklungstendenzen*

Jan D. Schmitt-Tegge**

Die Menge der Sonderabfälle hat abgenommen. Grund: Steigende Beseitigungskosten und steigende Preise für Rohstoffe und Energie. Daraus folgt die Tendenz zur Wiederverwertung oder zu abfallarmen Technologien. Die Verfahren der Tiefversenkung, Einkapselung und Verfestigung, Verbrennung auf Hoher See und Einbringung/Verklappung auf Hoher See werden behandelt. Die zukünftige Entwicklung in der Bundesrepublik hinsichtlich der Abfallbeseitigung auf Hoher See wird aufgezeigt.

Special processes for the disposal of industrial waste products – the mode of action and development tendencies. The amount of hazardous wastes is decreasing, as the costs of treatment, resources and energy increase. As a consequence, recycling and non-waste-technologies are being encouraged. The techniques of deep-well injection, encapsulation, solidification, incineration disposal at sea and the further development of these techniques are discussed.

1 Entwicklungstendenzen der letzten Jahre – Abfallmenge und Abfallzusammensetzung

Die Menge und die Zusammensetzung der Sonderabfälle, die in der Bundesrepublik Deutschland Jahr für Jahr gesammelt, transportiert und beseitigt werden, ist nach wie vor nur ungenau bekannt. Das überrascht, da drei Erfassungsmöglichkeiten bestehen, die grundsätzlich eine genaue Kenntnis erlauben würden.

Die Befragung aller Abfallerzeuger gemäß Umweltstatistikgesetz im zweijährigen Turnus ist ungenau, weil

- die Zuordnung zu den Kategorien der „besonders überwachungsbedürftigen Abfälle“ nach § 2 Abs. 2 AbfG oft nicht genau möglich ist,
- die Betriebe ihre eigenen Abfallmengen bisweilen nicht genau kennen,
- Vorbehalte gegen Befragungen aus Furcht vor fremd- oder innerbetrieblicher Kontrolle und aus Scheu vor der damit verbundenen Arbeit bestehen.
- die innerbetriebliche Vorbehandlung (z. B. Schlammmentwässerung) die Abfallmenge beeinflusst.

* Vortrag auf der GVC-Vortragsveranstaltung „Beseitigung von Industrieabfällen – Stand der Technik und Entwicklungstendenzen“ am 8./9. Dez. 1980 in Düsseldorf.

** Prof. Dr. Jan D. Schmitt-Tegge, Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 1000 Berlin 33.

Das Begleitscheinverfahren nach § 11 AbfG und die mögliche Auswertung der Begleitscheine ist ungenau, weil