

Konzeption eines sterilen Aufkonzentrierens von Milch durch mehrstufige Entspannungsverdampfung

von Chr. Kiesner¹⁾ und R. Eggers²⁾

¹⁾ Institut für Verfahrenstechnik der Bundesanstalt für Milchwissenschaft, Kiel

²⁾ Arbeitsbereich Verfahrenstechnik II, Thermische Verfahrenstechnik, Technische Universität, Hamburg

1. Einleitung

Bei der Herstellung von Kondensmilch oder von Milchkonzentraten als Zwischenprodukt für die Trocknung werden in der Praxis überwiegend thermische Aufkonzentrierungsverfahren eingesetzt. Hierfür steht eine Reihe von Verdampferbauarten zur Verfügung, die wegen der hitzeinduzierten Schädigungen von Milch Inhaltsstoffen vorzugsweise mit niedriger Siedetemperatur unter Vakuumbedingungen betrieben werden. Die Haltbarkeit der so hergestellten Konzentrate wird durch anschließende Hitzebehandlung erreicht. Dabei können sowohl Sterilisierverfahren in verschlossenen Behältnissen als auch im kontinuierlichen Durchfluß mit anschließender aseptischer Abfüllung angewendet werden.

Um die notwendige Hitzestabilität und spätere Lagerstabilität des Konzentrates zu erhalten, ist es in der Regel üblich aber auch notwendig, daß Stabilisatoren zugesetzt werden, die die Gerinnung des Eiweißes bzw. Ausflockung und/oder Gelierung wirksam verhindern. In der Bundesrepublik Deutschland sind gemäß der Verordnung über Milcherzeugnisse (1) mehrere Zusatzstoffe als Stabilisatoren (Natrium- oder Kaliumhydrogencarbonat, Calciumchlorid, Natrium- oder Kaliumcitrate, Natrium- oder Kaliumorthophosphate, Natrium- und Kaliumdisphosphate) für Kondensmilch zugelassen.

Neue Erkenntnisse zeigen jedoch, daß eine Behandlung bestehend aus Thermisierung und Homogenisierung der Milch vor und nach dem Aufkonzentrieren, (s. Behandlungsschritt Stabilisieren, Homogenisieren, Abb.1a) durchaus eine zufriedenstellende Hitzestabilität beim Sterilisieren der Konzentrate auch ohne Zusatzstoffe ermöglicht (2, 3, 4).

Insbesondere bei der Kondensmilchherstellung ist das herkömmliche Eindampfverfahren sehr energieaufwendig. Dies liegt daran, daß die erforderliche Wärmeenergie dem Produkt sowohl bei der Vorbehandlung und Aufkonzentrierung als auch beim anschließenden Sterilisieren des Konzentrates mehrfach zugeführt und entzogen wird. Abb. 1a zeigt einen praxisrelevanten Temperaturverlauf während der Herstellung von Kondensmilch nach dem herkömmlichen Verfahren.

Die Entwicklung bei der Kondensmilchherstellung in den letzten Jahren zeigt, daß das Sterilisieren des Konzentrates im kontinuierlichen Durchfluß überwiegend zum Einsatz kommt. Vor der Erhitzung werden der Kondensmilch Stabilisatoren zugegeben. Danach erfolgt eine aseptische Abfüllung in Kartonverpackungen. In Gegensatz zum Sterilisierverfahren in verschlossenen Behältnissen, beispielsweise in Blechdosen oder in Glasflaschen, bietet das Sterilisieren im kontinuierlichen Durchfluß in der Regel eine schonendere Konzentratbehandlung, die sich durch schwächere Intensität thermisch induzierter Bräunungsreaktionen im Produkt auszeichnet.

Durch die Möglichkeit einer kontinuierlichen aseptischen Abfüllung der Kondensmilch am Ende des Herstellungsverfahrens bietet sich prinzipiell eine neue Verfahrensvariante an, bei der der Sterilisiervorgang vor dem Aufkonzentrieren der Milch erfolgt. Demnach würde die Ausgangsmilch zuerst sterilisiert und nach Erreichen der Erhitzungstemperatur und anschließender Heißhaltung während der Abkühlphase unter sterilen Bedingungen auf die erforderliche Trockenmasse durch das Eindampfen aufkonzentriert und aseptisch abgefüllt. Da erfahrungsgemäß die Erhitzung pasteurisierter Ausgangsmilch hinsichtlich der Hitzestabilität keine Probleme bereitet, könnte bei dem vorgeschlagenen Verfahren die Menge von Stabilisierungssalzen reduziert oder auf deren Zusatz ganz verzichtet werden. Für das Eindampfen (Aufkonzentrieren) von Milch während der Abkühlphase könnte die zuvor beim Erhitzen zugeführte Wärmeenergie genutzt und dabei ein erheblicher Einsparungseffekt erzielt werden. Der höhere Energieeinsatz beim Sterilisieren von im Vergleich zur Konzentrat größeren Menge an Ausgangsmilch könnte damit ebenfalls kompensiert werden. Abb. 1b zeigt qualitativ den Temperaturverlauf bei einem solchen Verfahren, woraus deutlich erkennbar ist, daß die Temperaturschaukel des herkömmlichen Verfahrens, s. Abb. 1a, vermieden werden kann.

Als geeignetes Verfahren für das Aufkonzentrieren einer Ausgangsmilch während des Abkühlvorgangs bietet sich die mehrstufige Entspannungsverdampfung mit zusätzlicher Nutzung der Brühdampfenergie an. Nachfolgend werden die Möglichkeiten dieser Eindampftechnik näher erläutert und die verfahrenstechnischen Berechnungsgrundlagen aufgestellt.

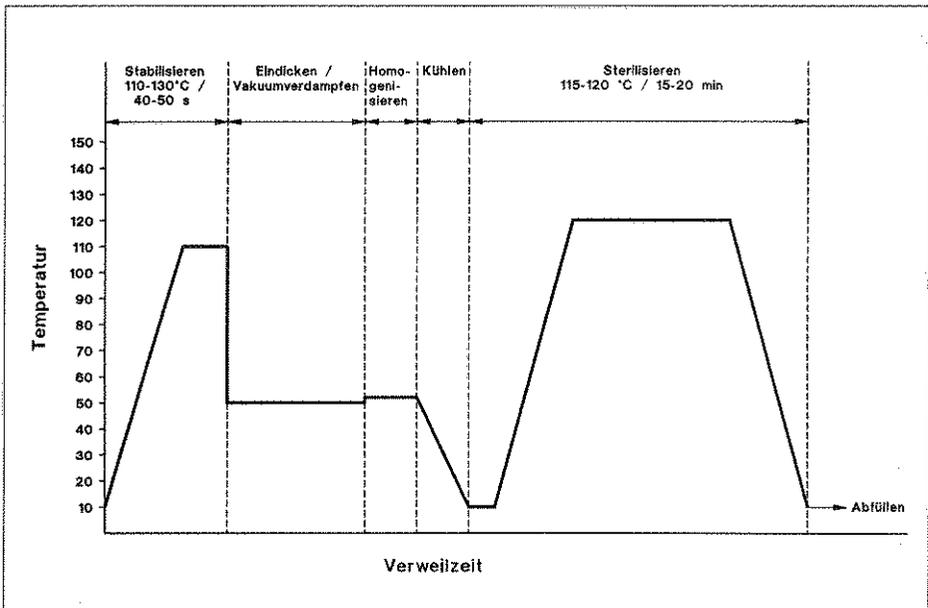


Abb. 1a: Qualitativer Temperaturverlauf im Produkt bei der Herstellung von Kondensmilch nach dem herkömmlichen Verfahren bestehend aus folgenden Schritten: *thermisches Stabilisieren (110-130 °C für 40 bis 50 sec), Eindicken unter Vakuumbedingungen, Homogenisieren, Kühlen, Zugabe von Stabilisierungssalzen, Sterilisieren-Aufheizphase-Kühlphase, Abfüllung.*

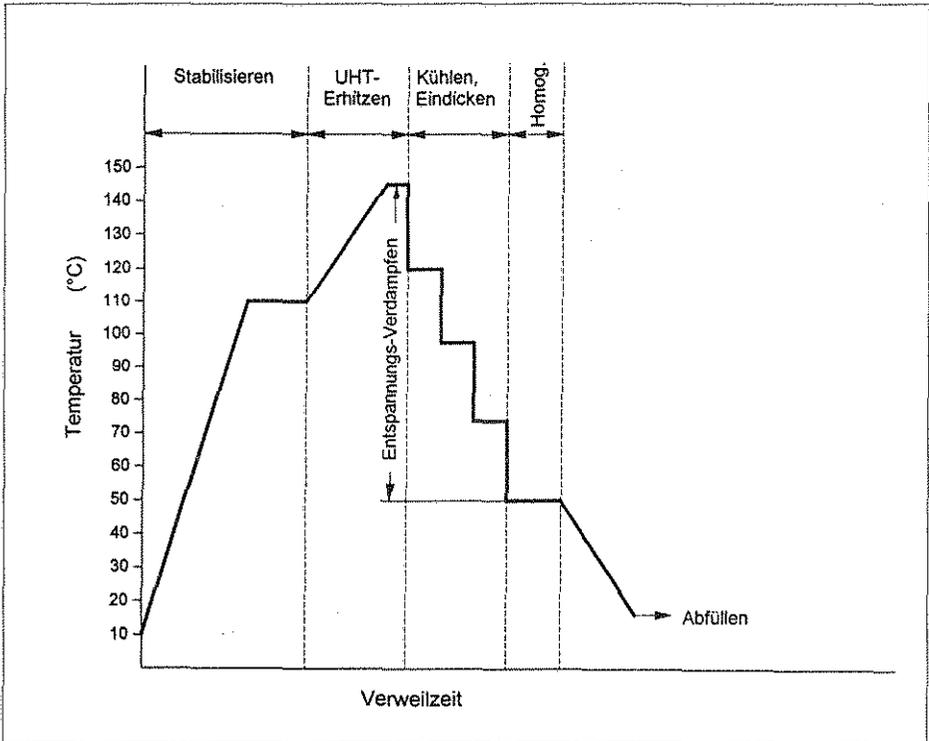


Abb. 1b: Qualitativer Temperaturverlauf im Produkt nach dem neuen Herstellungsverfahren von Kondensmilch bestehend aus folgenden Schritten: *thermisches Stabilisieren, Sterilisieren- Aufheizphase bis zur Erhitzungstemperatur-Heißhaltephase-Abkühlphase durch Entspannungsverdampfung und Vorkonzentrierung, Homogenisieren, Nachkonzentrieren unter Vakuumbedingungen, Abfüllen.*

2. Beschreibung des Verfahrens

Für das Herstellen von sterilen Milchkonzentraten nach der vorgeschlagenen vorgezogenen Sterilisierung kann das direkte UHT-Erheizungsverfahren von Milch (Ultrahocherhitzung) mit mehrstufiger Entspannungsverdampfung in modifizierter Form eingesetzt werden. Dieses Erheizungsverfahren wird gemäß der Milchverordnung (MVO) (5) im Temperaturbereich zwischen 135 °C bis 150 °C durchgeführt. Der Aufheizvorgang auf die gewünschte Erhitzungstemperatur erfolgt überwiegend durch indirekte Wärmeübertragung zwischen Heizmedium und Milch in dafür ausgelegten Wärmeübertragern. Um das Ausdampfen des Milchwassers bei den angegebenen hohen Erhitzungstemperaturen zu verhindern, wird mit Hilfe einer Druckerhöhungspumpe und eines Druckhalteventils in der Aufheizabteilung und den nachgeschalteten Heißhalte- und Kühlabteilungen ein Druck von 6 bar oder höher aufrechterhalten. Ein Vorschalten von Heißhaltern in der Aufheizphase ist technisch möglich und wird in der Praxis auch eingesetzt. Die Verweilzeiten der Milch während der Aufheiz- und Abkühlphasen sind von der Auslegung der eingesetzten Wärmeübertrager und dem Volumenstrom abhängig und fallen daher unterschiedlich lang aus. Die Länge dieser Zeitphasen sowie die Erhitzungstemperatur bestimmen die Intensität thermisch induzierter Veränderungen von Milch und zwar sowohl

in bakteriologischer als auch chemischer Hinsicht (6, 7). Bei der Herstellung von H-Milch muß neben dem vorgeschriebenen Temperaturbereich der obere Sterilisationswert von $F_c=70$ sec. unter allen Betriebsbedingungen eingehalten werden (5). Bei ungünstiger Auslegung einer indirekt arbeitenden UHT-Anlage sowie praxisbedingtem Ausfall von Verpackungsmaschinen können Schwierigkeiten beim Einhalten des vorgeschriebenen Grenzsterilisationswertes auftreten. Beim Einsatz von direkt arbeitenden UHT-Anlagen, d.h. mit schneller Erhitzung durch Dampfinjektion bzw. Infusion und anschließender Abkühlung durch Entspannungsverdampfung, treten diese Probleme nicht auf. Zur Verbesserung des verfahrensbedingt schlechteren Wärmerückgewinns kann eine mehrstufige Entspannungsverdampfung eingesetzt werden ((8) s. Abb. 2a und 2b).

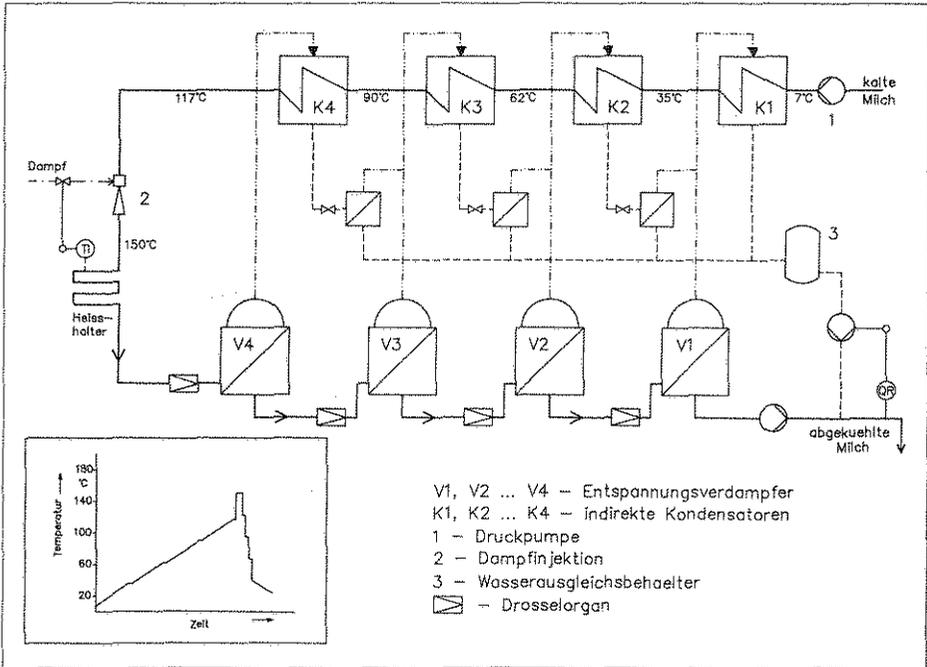


Abb. 2a: Fließschema einer direkt arbeitenden UHT-Anlage mit vierstufiger Entspannungskühlung und indirekter Vorwärmung der kalten Vorlaufmilch mit Brühdampf

Auf der Basis eines solchen direkten UHT-Verfahrens mit mehrstufiger Entspannungsverdampfung/Kühlung läßt sich eine Verfahrensvariante entwickeln, die für das Herstellen von Milchkonzentraten eingesetzt werden kann. Abb. 3 zeigt das Fließschema einer solchen Anlage mit vier Entspannungsstufen.

Die Ausgangsmilch wird zuerst durch die indirekt arbeitenden Vorwärmer (2V, 3V, 4V) geleitet, in denen sie durch Abkühlung des Brühdampfkondensates aus der jeweils zugeordneten Verdampferstufe vorgewärmt wird. Die Anzahl der Vorwärmstufen entspricht der der Entspannungsstufen des Verdampfers. Nach der Vorwärmung wird die Milch in der Erhitzungsabteilung auf die gewünschte Erhitzungstemperatur zwischen 135 °C bis 150 °C erhitzt und bei dieser Temperatur heißgehalten. Anschließend wird sie in die Verdampferstufen geleitet.

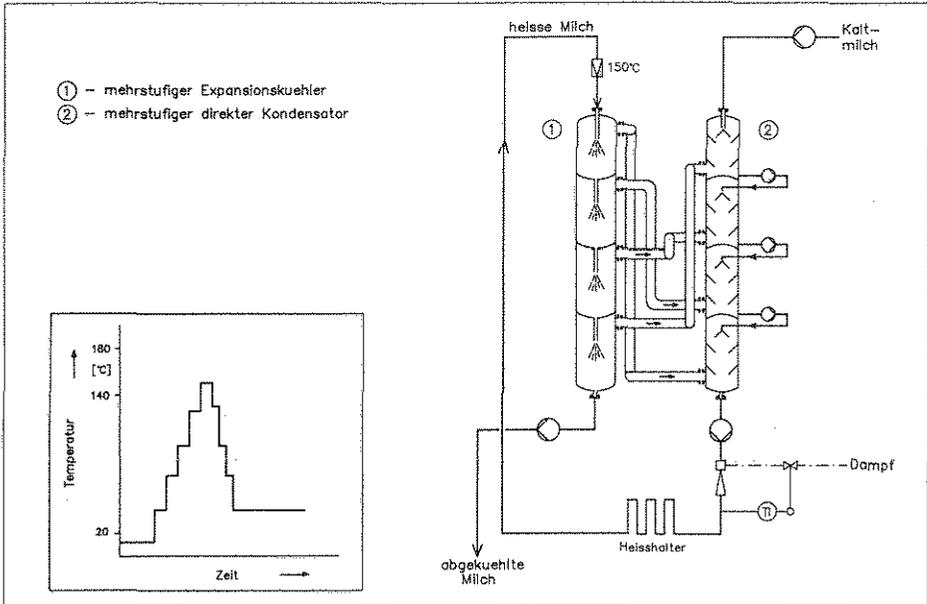


Abb. 2b: Vereinfachte Ausführung einer direkt arbeitenden UHT-Anlage mit vierstufiger Entspannungskühlung und direkter Vorwärmung der kalten Vorlaufmilch mit Brühdendampf

Der Entspannungsverdampfer kann aus mehreren Stufen aufgebaut werden, wobei die erste Stufe (1) als einfacher Entspannungsverdampfer ausgelegt ist. In den nachfolgenden Stufen (2, 3, 4), sind zusätzliche Wärmeübertrager eingebaut, die mit Brühdendampf der vorangegangenen Stufe beheizt werden. Als Drosselorgane (7) vor der ersten Stufe und zwischen den nachfolgenden werden Blenden oder Druckhalteventile eingesetzt. In der letzten Stufe herrscht ein Unterdruck, der mit Hilfe einer Vakuumpumpe (6) eingestellt wird. Das Druckgefälle zwischen dem Druck der heißen Milch p_a und dem Unterdruck p_4 (s. Abb. 3) wird um den gleichen Wert stufenweise in den jeweils installierten Verdampferstufen abgebaut. Der sich in der ersten Verdampferstufe gebildete Brühdendampf wird in den in der zweiten Stufe eingebauten Wärmeübertrager geleitet und dort kondensiert. Die dabei freiwerdende Wärme wird für eine zusätzliche Ausdampfung von Milchwasser in dieser Stufe genutzt. In den nachgeschalteten Verdampferstufen verläuft die Verdampfung analog. Das Brühdampfkondensat wird anschließend in der ihr zugeordneten Vorwärmstufe (2V, 3V, 4V) weiter heruntergekühlt und die kalte Zulaufmilch somit vorgewärmt. Damit verringert sich die Frischdampfzufuhr in der Erhitzungsabteilung (8).

Die zusätzliche Wärmezufuhr ab der zweiten Verdampferstufe (2) ist wegen der gewünschten hohen Trockenmassegehalte der Milchkonzentrate notwendig. Allein durch mehrstufige Entspannungsverdampfung lassen sich keine hohen Endtrockenmassegehalte erreichen. Abb. 4 zeigt das Verhältnis der End- und Eingangstrockenmassegehalte in Abhängigkeit von der Erhitzungstemperatur und der Anzahl der Verdampferstufen (9, 10). Aus dem Diagramm ist zu erkennen, daß höhere Aufkonzentrierungsverhältnisse als Faktor 1,4 sich praktisch nicht realisieren lassen. Für Milchkonzentrate sind jedoch Faktoren zwischen 2 bis 3 erforderlich.

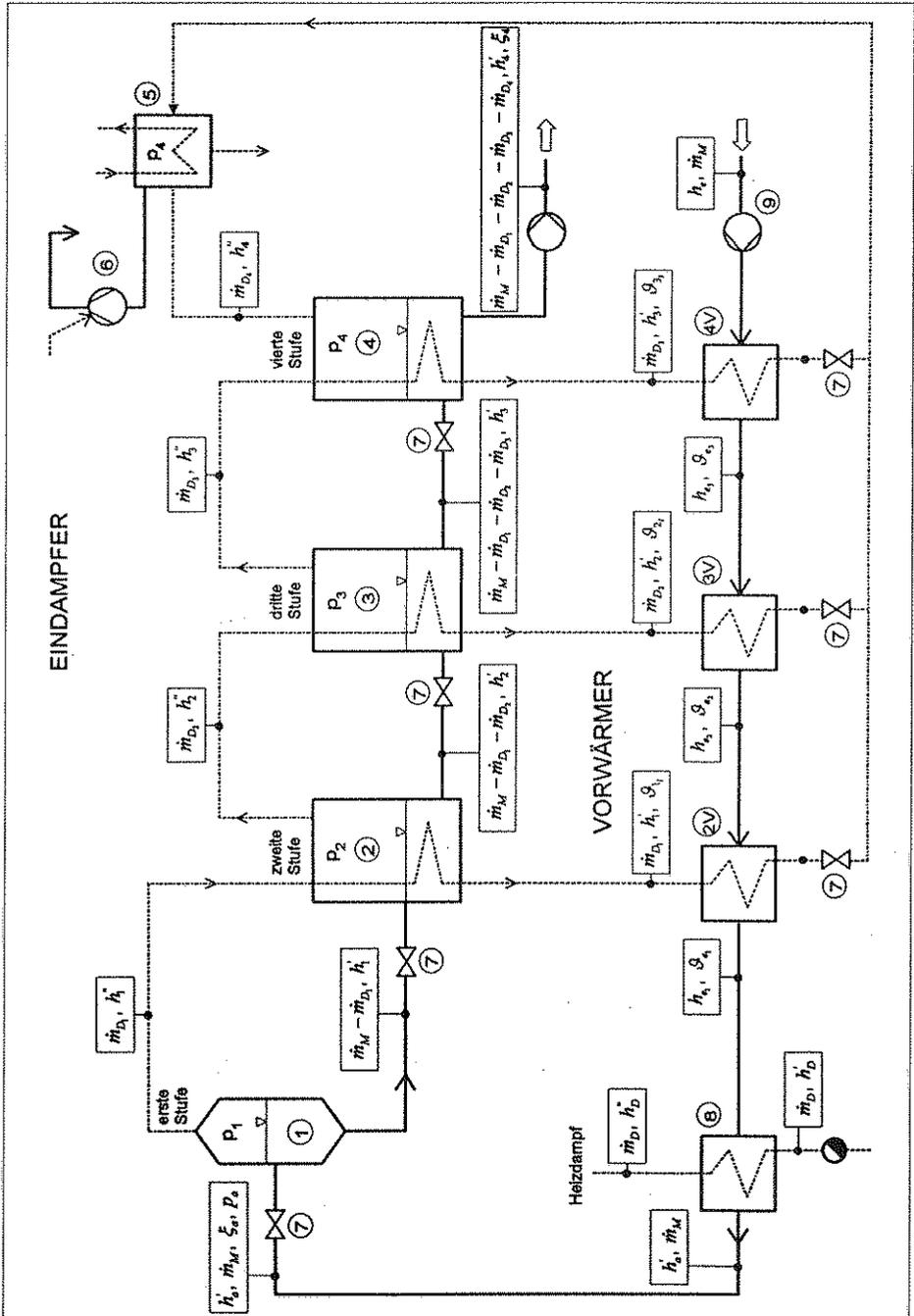


Abb. 3: Fließschema einer vierstufigen Entspannungsverdampfung nach dem neuen Herstellungsverfahren von Milchkonzentraten. 1- erste Entspannungsstufe des Verdampfers, 2,3,4- nachfolgende Entspannungsstufen des Verdampfers mit zusätzlicher Wärmezufuhr, 5- Brühdampfkondensator, 6- Vakuumpumpe, 7- Drosselventile, 8- Erhitzungsabteilung, 2V, 3V, 4V- Vorwärmer für die kalte Vorkaufmilch, 9- Druckpumpe

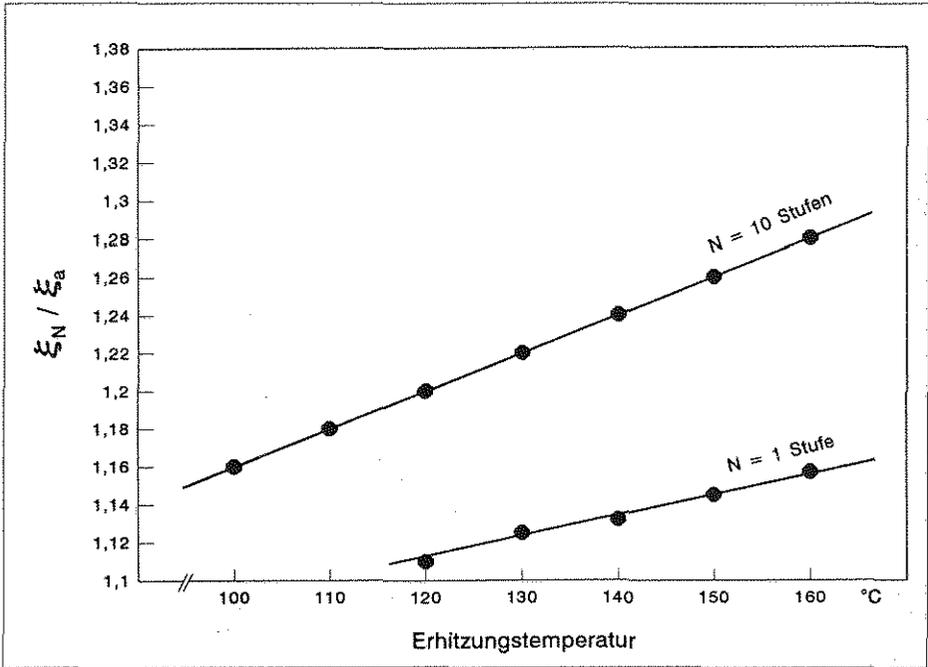


Abb. 4: Aufkonzentrierungsverhältnis bei reiner Entspannungsverdampfung für eine und zehn Stufen in Abhängigkeit von der Erhitzungstemperatur.

3. Wärme- und Stoffbilanzen bei mehrstufiger Entspannungsverdampfung.

a) erste Verdampfer-Stufe:

Wie bereits beschrieben, erfolgt die Verdampfung in der ersten Verdampferstufe nur durch die Entspannung der erhitzten Milch von dem Ausgangsdruck p_a auf den Druck p_1 (s. Abb. 3). Die ausgedampfte Brühdampfmenge kann aus der Wärmebilanzgleichung in der Formel

$$\dot{m}_M h'_a = h''_1 \dot{m}_{D_1} + h'_1 (\dot{m}_M - \dot{m}_{D_1}) \quad [1]$$

ermittelt werden.

Die gebildete Brühdampfmenge \dot{m}_{D_1} , wobei die Außenwärmeverluste des Apparates vernachlässigt werden, ergibt sich dann zu

$$\dot{m}_{D_1} = \frac{(h'_a - h'_1) \dot{m}_M}{r_1} \quad [2]$$

Hierin sind

- h'_a - Enthalpie der erhitzten Milch beim Druck p_a [kJ/kg]
- h'_1 - Enthalpie der Milch am Ausgang der ersten Verdampferstufe beim Druck p_1 [kJ/kg]
- h''_1 - Enthalpie des gesättigten Brühdampfes der ersten Verdampferstufe [kJ/kg]
- \dot{m}_M - Milchmassenstrom [kg/s]
- \dot{m}_{D1} - Brühdampfmassenstrom [kg/s]
- r_1 - Verdampfungswärme; $r_1 = h''_1 - h'_1$ [kJ/kg]

Die auf den Milchmassenstrom \dot{m}_M bezogene freiwerdende Brühdampfmenge \dot{m}_{D1} läßt sich unter Annahme eines für jede Verdampferstufe konstanten Enthalpieabfalls Δh , wie folgt beschreiben

$$\frac{\dot{m}_{D1}}{\dot{m}_M} = \frac{\Delta h}{r_1} \quad [3]$$

Der konstante Enthalpieabfall pro Stufe $\Delta h = \Delta h_1 = \Delta h_2 = \dots \Delta h_N$ läßt sich aus den Enthalpien der erhitzten Milch h'_a und der Enthalpie des Ausgangskonzentrates nach der N -ten Stufe h'_N folgendermaßen berechnen

$$\Delta h = \frac{h'_a - h'_N}{N} \quad [4]$$

wobei N die Gesamtzahl der Stufen ist.

b) zweite Verdampfer-Stufe:

In der zweiten Verdampferstufe (2) wird indirekt mittels eines Wärmeübertragers in das bereits auf den Druck p_2 entspannte Konzentrat zusätzlich Wärme zugeführt, s. Abb. 3. Die dabei infolge der Entspannung und der zusätzlichen Wärmezufuhr freiwerdende Brühdampfmenge sei als \dot{m}_{D2} bezeichnet. Als Heizmedium wird der in der ersten Stufe freigewordene Brühdampf eingesetzt. Das für die Wärmeübertragung nötige Temperaturgefälle ergibt sich aus der Differenz der Sättigungstemperatur des Brühdampfes unter dem Druck p_1 der ersten Stufe (1) und der Konzentrattemperatur unter dem Druck p_2 der zweiten Stufe (2). Da die Druckdifferenz $p_1 - p_2$ immer positiv ist, resultiert daraus auch ein positives Temperaturgefälle. Die Erhöhung der Siedetemperatur aufgrund des Anstiegs der Trockenmassegehalte in der zweiten und den nachfolgenden Stufen sollte bei der Auslegung der Wärmeübertrager berücksichtigt werden. Wegen der nicht allzu hohen Abweichungen, ca. 2 °C/Stufe (11), wird dies für die Gesamtbilanz der Anlage zunächst vernachlässigt. Aus der Wärmebilanzgleichung für die zweite Verdampferstufe in der Form

$$h'_1(\dot{m}_M - \dot{m}_{D1}) + h''_1 \dot{m}_{D1} = \dot{m}_{D1} h'_1 + \dot{m}_{D2} h''_2 + (\dot{m}_M - \dot{m}_{D1} - \dot{m}_{D2}) h'_2 \quad [5]$$

kann die auf den Milchmassenstrom bezogene Brühdampfmenge \dot{m}_{D2} ermittelt werden. Sie beträgt dann

$$\frac{\dot{m}_{D2}}{\dot{m}_M} = \frac{\left(1 - \frac{\dot{m}_{D1}}{\dot{m}_M}\right) \Delta h + \frac{\dot{m}_{D1}}{\dot{m}_M} r_1}{r_2} \quad [6]$$

Dabei wird die vollständige Kondensation des Brühdampfes im Wärmeübertrager vorausgesetzt. Analog dazu, können die Brühdampfmengen der nachfolgenden Stufen ermittelt werden. Für die dritte Stufe erhält man dann

$$\frac{\dot{m}_{D3}}{\dot{m}_M} = \frac{\left(1 - \frac{\dot{m}_{D1}}{\dot{m}_M} - \frac{\dot{m}_{D2}}{\dot{m}_M}\right) \Delta h + \frac{\dot{m}_{D2}}{\dot{m}_M} r_2}{r_3} \quad [7]$$

und für die n- te Stufe

$$\frac{\dot{m}_{Dn}}{\dot{m}_M} = \frac{\left(1 - \frac{\dot{m}_{D1}}{\dot{m}_M} - \dots - \frac{\dot{m}_{Dn-1}}{\dot{m}_M}\right) \Delta h + \frac{\dot{m}_{Dn-1}}{\dot{m}_M} r_{n-1}}{r_n} \quad [8]$$

Setzt man für die Verdampfungswärme r in der jeweiligen Stufe einen Mittelwert von \bar{r}_m ein, so vereinfacht sich die Gl. (7) zu

$$\frac{\dot{m}_{Dn}}{\dot{m}_M} = \frac{\Delta h}{\bar{r}_m} \left(1 - \sum_{x=1}^{n-1} \frac{\dot{m}_{Dx}}{\dot{m}_M}\right) + \frac{\dot{m}_{Dn-1}}{\dot{m}_M} \quad [9]$$

Aus der Massenbilanz der gesamten Anlage in der Form

$$\dot{m}_M \xi_a = \left(\dot{m}_M - \sum_{n=1}^N \dot{m}_{Dn}\right) \xi_N \quad [10]$$

kann die Endkonzentration des Konzentrates ξ_N nach N Stufen ermittelt werden. Sie beträgt

$$\xi_N = \frac{\xi_a}{1 - \sum_{n=1}^N \frac{\dot{m}_{Dn}}{\dot{m}_M}} \quad [11]$$

Das Verhältnis der Endkonzentration zu der Ausgangskonzentration beträgt demnach

$$\frac{\xi_N}{\xi_a} = \frac{1}{1 - \sum_{n=1}^N \frac{\dot{m}_{D_n}}{\dot{m}_M}} \quad [12]$$

Das Konzentrationsverhältnis ist von der Erhitzungstemperatur ϑ_a , dem Unterdruck p_0 in der letzten Entspannungsstufe und der Anzahl der Stufen abhängig. Abb. 5 zeigt den Anstieg des Konzentrationsfaktors bei einer Erhitzungstemperatur von 155 °C in Abhängigkeit vom Unterdruck in der letzten Stufe und der Anzahl der Stufen. Die Absenkung des Unterdruckes in der letzten Stufe führt zur Reduzierung der Anzahl von Stufen bei gleichbleibendem Aufkonzentrierungsfaktor. Dies ist für die Optimierung der Anlagenkosten von großer Bedeutung.

Eine weitere Ausnutzung der eingesetzten Wärmeenergie bei dem vorgeschlagenen Aufkonzentrierungsverfahren bietet der Einsatz des Brüdendampfkondensates für das Vorwärmen der kalten Vorlaufmilch. Dies kann durch einen Einbau von Vorwärmern erzielt werden in denen das Brüdendampfkondensat aus der dazugehörigen Verdampferstufe abgekühlt wird. Am Ausgang eines jeden Vorwärmers wird das abgekühlte Brüdendampfkondensat auf den Unterdruck im Kondensator (z.B. p_a , s. Abb. 3) entspannt und das Zweiphasengemisch aus allen Vorwärmern dem Kondensator zugeleitet. Die Anzahl der Vorwärmer entspricht der der Entspannungsverdampferstufen, ausgenommen die letzte. Abb. 6 zeigt qualitativ den Temperaturverlauf des Brüdendampfkondensates und der kalten Vorlaufmilch bei einer Gegenstromführung.

Legt man für den ersten Vorwärmer (zugeordnet in Fließrichtung der Vorlaufmilch der letzten Verdampferstufe) eine für die Wärmeübertragung erforderliche Temperaturdifferenz von $\Delta\vartheta_{vW}$ fest, so kann die Ausgangsenthalpie der Vorlaufmilch vor der Erhitzungsabteilung wie folgt berechnet werden

$$h_{e1} = \frac{\bar{c}_M}{\bar{c}_W} h'_1 - \Delta\vartheta_{vW} \bar{c}_M \quad [13]$$

Die Kondensatenthalpie h'_1 des Brüdendampfes aus der ersten Verdampferstufe kann mit Hilfe der Enthalpie der erhitzten Milch h'_a und des Enthalpieabfalls in den Verdampferstufen Δh (s. Gl. 4) in der Form $h'_1 = h'_a - \Delta h_1$ berechnet werden. Die Ausgangsenthalpie der vorgewärmten Vorlaufmilch bei N-Verdampferstufen ergibt sich dann zu

$$h_{e1} = \frac{\bar{c}_M}{\bar{c}_W} \left(h'_a - \frac{h'_a - h'_N}{N} \right) - \Delta\vartheta_{vW} \bar{c}_M \quad [14]$$

Aus der Wärmebilanz der Erhitzungsabteilung (s. Abb. 3) in der Form

$$\dot{m}_D r_D = \dot{m}_M (h'_a - h_{e1}) \quad [15]$$

kann der auf den Milchmassenstrom bezogene Dampfverbrauch abgeleitet werden.

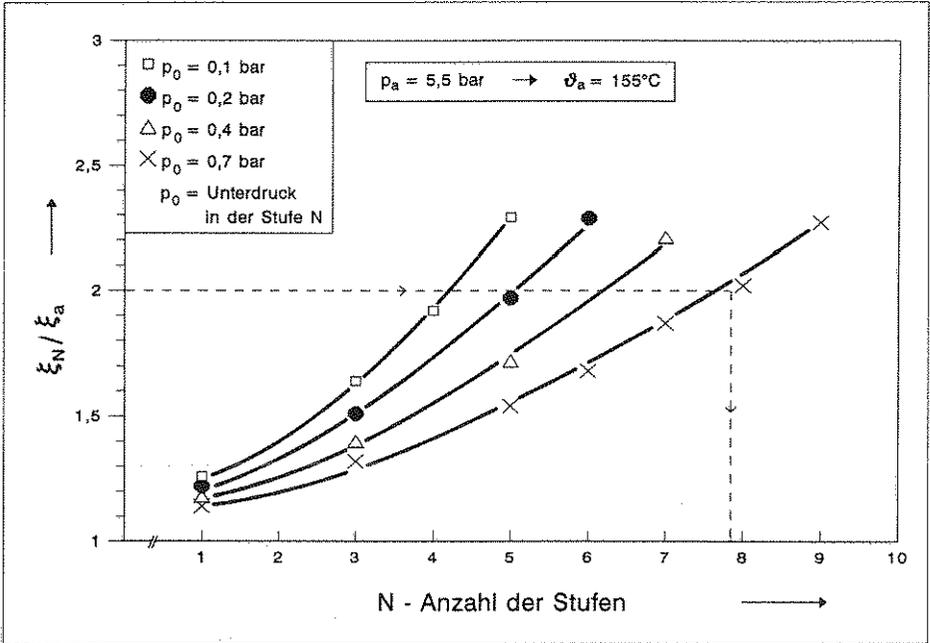


Abb. 5: Aufkonzentrierungsverhältnis beim Entspannungsverdampfer mit zusätzlicher Wärmezufuhr in Abhängigkeit vom Unterdruck in der letzten Stufe und Anzahl der Stufen.

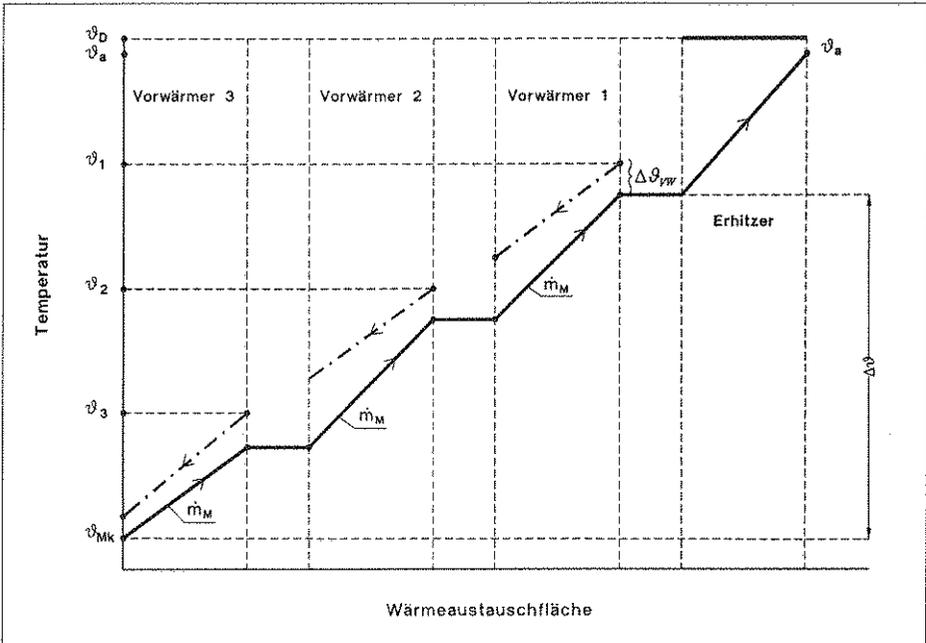


Abb. 6: Qualitativer Temperaturverlauf bei der Vorwärmung kalter Vorlaufmilk.

Er beträgt entsprechend

$$\frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_M} = \frac{h'_a(1 - \bar{c}_M/\bar{c}_W) - \Delta\vartheta_{VW}\bar{c}_M}{r_D} + \frac{\bar{c}_M/\bar{c}_W(h'_a - h'_N)}{r_D N} \quad [16]$$

Dabei ergeben sich folgende funktionelle Abhängigkeiten der in Gl. 16 aufgeführten Größen:

- h'_N = f (Druckes in der letzten Verdampferstufe),
- h'_a = f (Erhitzungstemperatur der Milch)
- r_D = f (Heizdampfdruckes),

Abb. 7 zeigt den auf Milchmassenstrom bezogenen Dampfverbrauch in Abhängigkeit von der Stufenzahl. Unter den in der Abbildung angegebenen Bedingungen kann der Dampfverbrauch von 22 % bei einer Stufe auf ca. 3 % bei zehn Stufen reduziert werden. Aus dem Verlauf der Kurve ist darüber hinaus erkennbar, daß schon durch den Einsatz von drei Entspannungsstufen eine Dampfverbrauchsreduzierung um Faktor drei möglich ist, wobei ein weiteres Absenken einen überproportional großen Anstieg der Stufenanzahl erfordert. Vergleichsweise liegt der bezogene Dampfverbrauch bei einer 3-stufigen Verdampferanlage mit thermischer Brüdenverdichtung bei ca. 13 %. Daraus ist ersichtlich, daß bei dem vorgeschlagenen Verfahren eine erhebliche Energieeinsparung gegenüber dem herkömmlichen möglich ist.

Verfahrensbedingt muß die Abkühlung mit Aufkonzentrierung unter sterilen Verhältnissen ablaufen. Apparatetechnisch würden sich hierfür Plattenverdampfer gut eignen. Sie zeichnen sich durch kompakte Bauweise aus und bieten darüber hinaus günstige Wärmeübertragungsverhältnisse an. Abb. 8 zeigt vereinfachend das Schaltungsschema

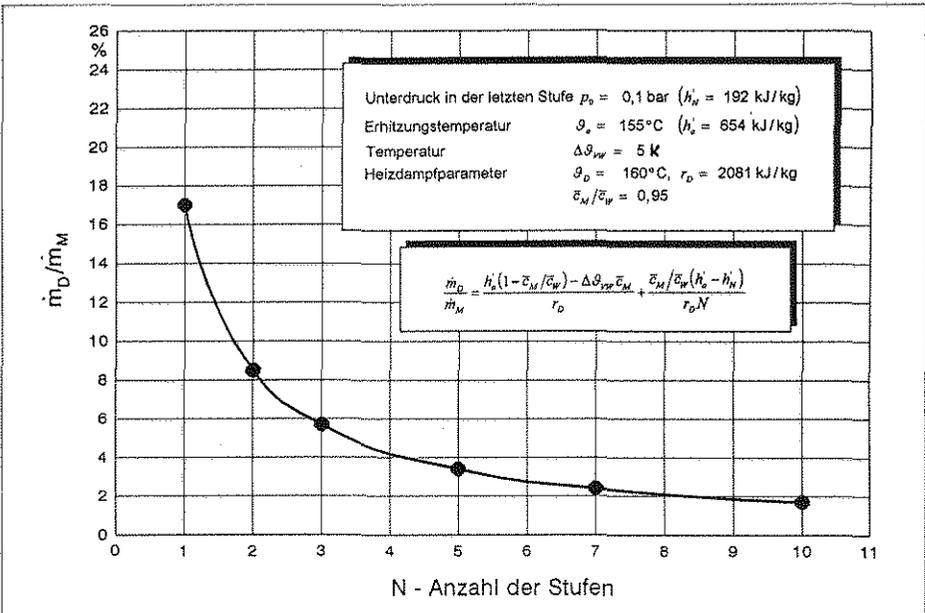


Abb. 7: Auf den Milchmassenstrom bezogener Dampfverbrauch in Abhängigkeit von der Anzahl der Verdampferstufen.

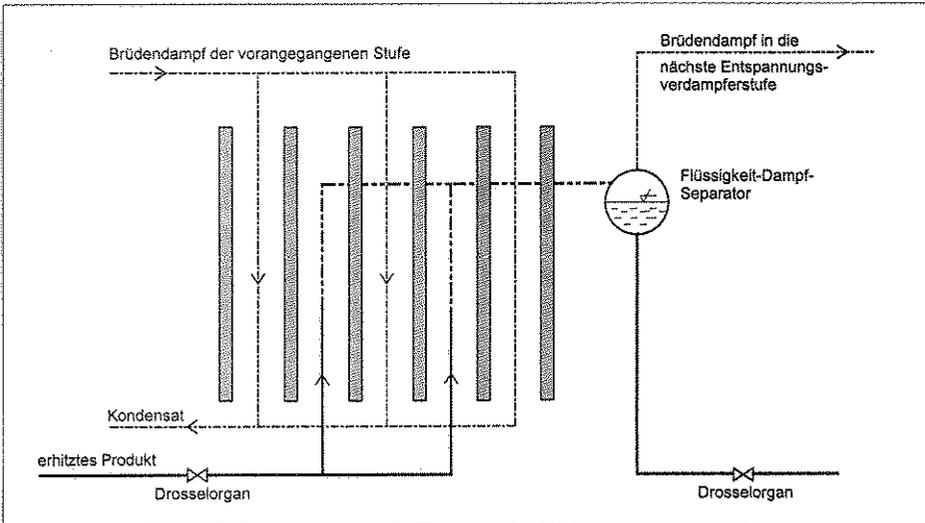


Abb. 8: Funktionsprinzip der Eindampfung im Plattenverdampfer

einer Verdampferstufe, die der jeweiligen Leistung der Anlage durch die Veränderung der Anzahl paralleler Fließwege angepaßt werden kann. Das Drosselorgan und der Brühdampfabscheider befinden sich außerhalb der Abteilung, es wären jedoch technische Lösungen denkbar, bei denen sowohl das Druckgefälle durch entsprechendes Profilmuster als auch die Phasentrennung innerhalb des Fließweges zu integrieren. Abb. 9 zeigt das Fließschema einer vollständigen Kondensmilchherstellungsanlage mit vorge-

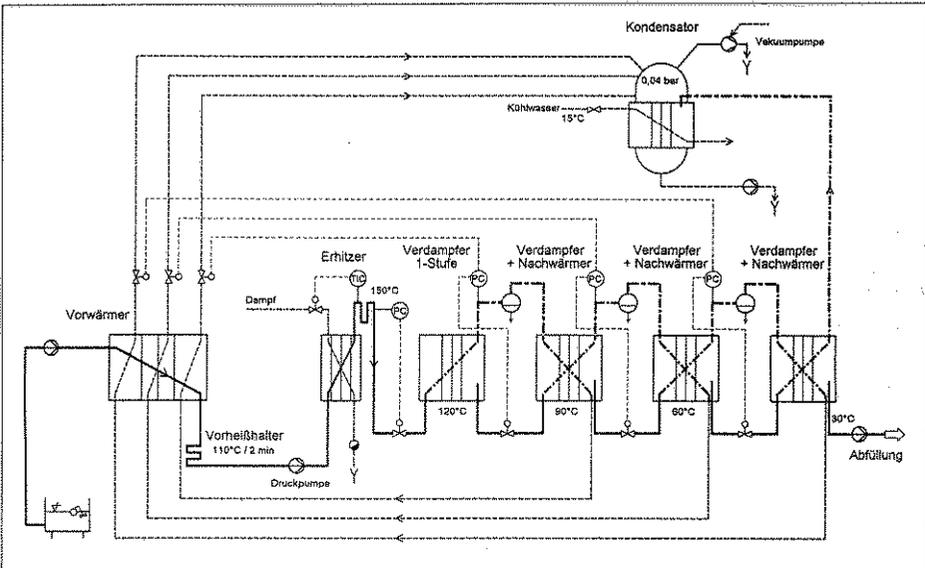


Abb. 9: Kombinierte Plattenerhitzungs- und Verdampferanlage für die Herstellung von Kondensmilch mit vorgezogener Sterilisierung

zogener Sterilisierung, bestehend aus Plattenwärmeübertragern und Plattenverdampfern. Ein Zwischenschalten von Vorheizhaltern nach dem Vorwärmer für die erforderliche Stabilisierung des Eiweißes ist einfach möglich, ebenso wie der Einbau eines Heizhalters nach dem Erreichen der Sterilisiertemperatur. Im Vergleich zu den anderen Verdampferbauarten, wie z.B. den Fallstromverdampfern, die überwiegend bei der Herstellung von Kondensmilch heute eingesetzt werden, sind die Plattenverdampfer sehr platzsparend und überschaubar geschaltet.

Formelzeichen:

c_M	– Spezifische Wärme der Milch (Mittelwert im bestimmten Temperaturbereich)	[kJ/kg K]
c_W	– Spezifische Wärme des Wassers (Mittelwert im bestimmten Temperaturbereich)	[kJ/ kg K]
$h^I_{1,2...N}$	– Enthalpie des Produktes in den jeweiligen Verdampferstufen 1,2 ...N	[kJ/kg]
$h^{II}_{1,2...N}$	– Enthalpie des gesättigten Wasserdampfes in den jeweiligen Verdampferstufen 1;2 ...N	[kJ/kg]
h^I_a	– Enthalpie des erhitzten Produktes	[kJ/kg]
h_{et}	– Enthalpie des Produkts am Ausgang aus dem letzten Vorwärmer	[kJ/kg]
$\dot{m}_{D1,2...N}$	– ausgetriebene Dampfmenge in den jeweiligen Verdampferstufen 1,2 ...N	[kg/s]
\dot{m}_D	– Heizdampfmassenstrom in der Erhitzungsabteilung	[kg/s]
\dot{m}_M	– Produktmassenstrom	[kg/s]
N	– Gesamtzahl der Verdampferstufen	
r_D	– Verdampfungswärme des Heizdampfes	[kJ/kg]
r_m	– mittlere Verdampfungswärme für alle Verdampferstufen	[kJ/kg]
$r_{1,2...N}$	– Verdampfungswärme in den jeweiligen Verdampferstufen 1,2...N	[kJ/kg]
Δh	– Enthalpiespreizung in den Verdampferstufen	[kJ/kg]
ϑ_{VW}	– Temperaturdifferenz zwischen Brühdampfkondensat und Produkt im letzten Vorwärmer	[K]
ξ_N	– Trockenmassegehalt des Produkts nach der letzten Verdampferstufe	[%]
ξ_a	– Trockenmassegehalt des Produkts am Verdampfereingang	[%]
ϑ_a	– Erhitzungstemperatur	[°C]

Danksagung

Herrn Prof. W. Buchheim, Institut für Verfahrenstechnik der Bundesanstalt für Milchwissenschaft in Kiel, danke ich für die Diskussion über die Grundidee dieses Verfahrens sowie für die Anregung zu einigen technologischen Vorversuchen.

4. Literatur

- (1) Verordnung über Milcherzeugnisse (Milcherzeugnisverordnung-MilchErzV) vom 15. Juli 1970 (BGBl. IS.1150) A3 Anlage 2 25-26 13. Erg.Lfg. (15.4.1991)
- (2) DBP 3922394 C2; Verfahren zur Herstellung von Kondensmilch vom 10.12.1992
- (3) Singh, H., Creamer, L.K., and Newstead, D.F.: Effects of heat on the proteins of concentrated milk systems. Bulletin of the International Dairy Federation Nr. 238 94-107 (1989)
- (4) Leviton, A., Anderson, H.A., Vettel, H.E., Vestal, J.H.: Journal of Dairy Science 46 310-319 (1963)
- (5) Verordnung über Hygiene- und Qualitätsanforderungen an das Gewinnen, Behandeln und Inverkehrbringen von Milch (Milchverordnung) vom 23.6.1989 A2 17-18
- (6) Reuter, H.: UHT-Milch aus technologischer Sicht. Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 34 (4) 347-361 (1982)
- (7) Reuter, H., Biewendt, H.-G., Kornietzko, M.: Bewertung der thermischen Wirksamkeit von UHT-Anlagen. Deutsche Molkereizeitung (München) F.48 1793-1798 (1980)

- (8) Kiesner, Chr.: Direkte Milcherhitzung: Alternative für eine bessere Qualität und die Einhaltung der Sterilisationswerte?. Die Molkerei-Zeitung WELT DER MILCH 46 23/24 683-686 (1992)
- (9) Höffer, K.: Wärmetechnische Berechnung mehrstufiger Entspannungsverdampfer zur Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser. Dissertation TH Karlsruhe (1962)
- (10) Rant, Z.: Verdampfen in Theorie und Praxis. Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt am Main 1977
- (11) Kessler, H.G.: Lebensmittelverfahrenstechnik, Schwerpunkt Molkereitechnologie. A. Kessler Verlag 1976

5. Zusammenfassung

Kiesner, Chr., Eggers, R.: **Konzeption eines sterilen Aufkonzentrierens von Milch durch mehrstufige Entspannungsverdampfung.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 46 (2) 151–166 (1994)

64 Kondensmilchherstellung (Entspannungsverdampfung)

Das Herstellen von sterilen Milchkonzentraten, wie beispielsweise bei der Kondensmilch, wird heute durchweg in der Weise durchgeführt, daß das Aufkonzentrieren der Ausgangsmilch vor dem Sterilisieren vorgezogen wird. Diese Herstellungsart, die bei der Sterilisierung des Konzentrates in geschlossenen Behältnissen standardmäßig eingesetzt wird und bei einer Abfüllung unter nichtsterilen Verhältnissen anders nicht durchführbar ist, wird auch beim Sterilisieren im kontinuierlichen Durchfluß nach dem UHT-Verfahren eingesetzt. Zur Erhaltung der Hitze- und Lagerstabilität des Konzentrates werden meistens Stabilisierungssalze zugesetzt. Bei dem vorgeschlagenen kombinierten Sterilisier- und Aufkonzentrierungsverfahren wird die Ausgangsmilch zuerst im kontinuierlichen Durchfluß sterilisiert, z.B. nach dem UHT-Verfahren. Nach dem Erreichen der gewünschten Sterilisiertemperatur erfolgt während der anschließenden Abkühlung das Aufkonzentrieren des Produkts. Dieser Verfahrensschritt kann mit Hilfe der Entspannungsverdampfung durchgeführt werden, bei dem neben der Wasserverdampfung zugleich die Abkühlung des Konzentrates stattfindet. Durch den Einsatz mehrstufiger Entspannungsverdampfung und einer zusätzlichen Nutzung des Brühdampfers für die Eindampfung des Produktes lassen sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Stufen Trockenmassegehalte bis ca. 40 % erreichen. Für das Aufkonzentrieren der Ausgangsmilch während der Abkühlphase, wird ausschließlich die Energie genutzt die dem Produkt beim Aufheizen auf die gewünschte Sterilisiertemperatur zugeführt worden ist. Daraus ergibt sich gegenüber dem herkömmlichen Herstellungsverfahren eine erhebliche Energieeinsparung, die darüber hinaus durch die Nutzung des Brühdampfkondensates bei der Vorwärmung des kalten Vorlaufproduktes erhöht werden kann. Das neue Verfahren setzt voraus, daß die Abkühlung mit Aufkonzentrierung unter sterilen Bedingungen durchgeführt wird. Dies ist technisch mit Hilfe der Entspannungsverdampfung gut möglich.

Summary

Kiesner, Chr., Eggers, R.: **Conception of a sterile concentration process of milk by multistage flash evaporation.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 46 (2) 151–166 (1994)

64 Evaporated milk manufacture (flash evaporation)

Today sterile milk concentrates, as, e.g. evaporated milk, are produced in a manner that concentration of milk is done prior to sterilization. This manufacturing process, which

is normally applied, if the concentrate is sterilized in closed containers and is not feasible otherwise under non-sterile filling conditions, is also used, if the product is sterilized continuously according to the UHT-process. To maintain heat stability and shelf life of the concentrate mostly stabilizers are added. With the proposed combined sterilization- and concentration process the milk is first sterilized continuously, e.g. according to the UHT-process. After reaching the desired sterilization temperature the product is concentrated during subsequent cooling. This processing step can be carried out using flash evaporation; here not only water evaporation, but also cooling of the concentrate takes place. Multistage flash evaporation and additional utilization of the vaporizer for evaporation of the product allow dry matter contents of up to approximately 40 % to be obtained as a function of the number of units. For concentrating the milk during the cooling phase exclusively energy is used which is applied to the product during heating to the desired sterilization temperature. Compared with the traditional manufacturing method this leads to considerable energy savings, which can, further, be increased by use of the vapor condensate during preheating of the cold product. The new method presupposes that cooling associated with concentration is carried out under sterile conditions. This is technically easily possible by means of flash evaporation. As to the apparatus to be used, the plate evaporator would be well suited for this.

Résumé

Kiesner, Chr., Eggers, R.: **Conception d'un procédé de concentration stérile du lait à l'aide de la vaporisation flash à plusieurs étages.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 46 (2) 151-166 (1994)

64 Fabrication du lait concentré (vaporisation flash)

Aujourd'hui des concentrés de lait stériles, comme, par exemple, du lait concentré, sont fabriqués de telle manière que la concentration du lait est effectuée avant la stérilisation. Ce procédé, qui est normalement appliqué, quand le concentré est stérilisé dans des récipients fermés et qui n'est pas applicable autrement en cas du remplissage dans des conditions non stériles est aussi utilisé lors de la stérilisation continue selon le procédé UHT. Afin de maintenir la stabilité à la chaleur et la conservabilité du concentré on ajoute normalement des stabilisateurs. Avec le procédé de stérilisation et de concentration proposé le lait est, d'abord, stérilisé continuellement, par exemple, selon le procédé UHT. Après avoir atteint la température de stérilisation désirée le produit est concentré au cours du refroidissement qui suit. Ce pas du procédé peut être réalisé à l'aide de la vaporisation flash, au cours de laquelle non seulement l'évaporation de l'eau, mais aussi le refroidissement du concentré a lieu. L'application de la vaporisation flash à plusieurs étages et l'utilisation additionnelle du vaporisateur à buées pour évaporer le produit permettent d'obtenir des teneurs en matière sèche allant jusqu'à approximativement 40 % en fonction du nombre des unités. Pour concentrer le lait au cours du refroidissement on emploie exclusivement de l'énergie utilisée pour le chauffage du produit à la température de stérilisation désirée. Comparé à la méthode traditionnelle ceci a pour conséquence une économie considérable d'énergie, qui peut encore être augmentée par l'utilisation du condensat de la vapeur lors du préchauffage du produit froid. Le procédé nouveau présuppose que le refroidissement associé avec la concentration est réalisé dans des conditions stériles. Du point de vue technique ceci est bien possible à l'aide de la vaporisation flash et du point de vue de l'appareillage à utiliser les évaporateurs à plaques seraient appropriés.