

Veränderung des Homogenisiergrades bei Anwendung von Homogenisiermaschinen in Erhitzeranlagen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit

Von Ch. Kiesner, M. Eschger und E. Wüst*

Institut für Chemie und Technologie der Milch, Bundesanstalt für Milchwissenschaft, Kiel
*Fachhochschule Hannover, Fachbereich Bioverfahrenstechnik

1. Einleitung

In der Milchwirtschaft kommen bei Erhitzungsanlagen überwiegend Plattenwärmeübertrager und Röhrenwärmeübertrager zum Einsatz. Neuerdings werden Röhrenwärmeübertrager eingesetzt, die einen stark verkleinerten Innendurchmesser der Innenrohre aufweisen (Turbo-Konzept). Der dabei auftretende höhere Druckabfall in den Wärmeübertragern wird durch einen Teil der Leistung der Homogenisiermaschine überwunden. Mit Hilfe dieses Verfahrens wird der Wärmeübergang erhöht und die thermische Belastung verringert.

Die Vorgänge beim Homogenisieren von Milch sind ausführlich untersucht und beschrieben worden (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7). Die Auswirkungen auf das Homogenisierergebnis bei dem Betrieb von Turbo-Anlagen wurden bisher wissenschaftlich noch nicht betrachtet.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, den Homogenisierereffekt, der bei der Verwendung des Turbo-Verfahrens auftritt, näher zu untersuchen. Das Homogenisierergebnis einer konventionellen Anlage sollte unter Verwendung von geeigneten Parametern mit dem Homogenisierergebnis einer Turbo-Anlage verglichen werden. Hierzu wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, die es ermöglicht, die Druckverhältnisse, wie sie in Produktionsanlagen herrschen, zu simulieren.

2. Erhitzeranlage nach dem Turbo-Konzept

Der Aufbau einer solchen Anlage entspricht weitestgehend dem Aufbau einer konventionellen Erhitzeranlage mit Rohrbündelwärmeübertrager (z.B. UHT-Erhitzer). Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Typen liegt in der Konstruktion der Rohrbündel. Bei den Turbo-Modulen werden Röhren eingesetzt, deren Innendurchmesser wesentlich kleiner sind als bei der konventionellen Anlage. Daraus resultiert eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit (daher der Begriff "Turbo"). Um die Wärmeübertragungsfläche zu vergrößern, wird die Anzahl der Röhren innerhalb des Rohrbündels erhöht. Turbo-Anlagen haben aufgrund des geringen Innendurchmessers der Rohre bedeutend höhere Druckverluste (bis zu 40 bar). Die Energie, die über den Homogenisator eingebracht wird, kann zur Erzeugung des entsprechenden Vordruckes genutzt werden.

Die Ziele, die mit solch einer Anlage verfolgt werden, sind:

- 1.) Durch ein günstigeres Oberflächen-Volumen-Verhältnis (größere Austauschfläche bei weniger Rohrinhalt) wird eine Verbesserung des Wärmeübergangs erzielt.

- 2.) Die Verweilzeiten in den Erhitzerabteilungen können aufgrund des erhöhten Wärmeübergangs und der höheren Strömungsgeschwindigkeit herabgesetzt werden (kürzere Aufheiz-/Abkühlphasen, s. Abb. 1), wodurch sich eine produktschonende Wärmebehandlung ergibt. Durch eine leicht erhöhte Erhitzungstemperatur wird der geforderte Abtötungseffekt erreicht (8).
- 3.) Der für eine optimale Homogenisierung benötigte Gegendruck muss nicht durch ein zweites Homogenisierventil, sondern kann durch die nachgeschalteten Turbo-Rohrbündel aufgebaut werden. Somit kann die zweite Homogenisierstufe evtl. eingespart werden.

Der Aufbau einer Ultrahoherhitzungsanlage mit Turbo-Modulen für eine Stundenleistung von 7.500 l wird beispielhaft kurz dargestellt. Die Vorwärmaabteilung III, die Erhitzerabteilung und die Rückkühlabteilung I bestehen aus Turbo-Modulen, deren Innenrohre einen Innendurchmesser von nur 6 mm haben. Aufgrund des geringen Innendurchmessers treten Strömungsgeschwindigkeiten von 4 m/s auf.

Bedingt durch den verbesserten Wärmeübergang in der Vorwärmaabteilung III, der Erhitzerabteilung und der Rückkühlabteilung I ergibt sich folgendes Temperatur-Zeit-Profil:

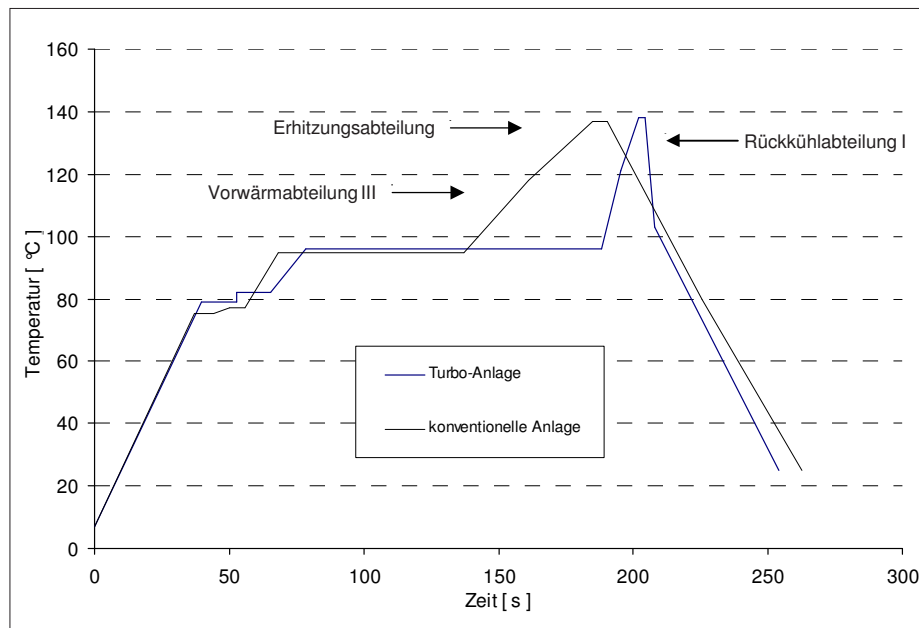


Abb. 1: Temperatur - Zeit - Diagramm

Aus den in Abb. 1 dargestellten Temperatur-Zeit-Bedingungen ergeben sich folgende Sterilisationswerte (F-Werte für die Abtötung von *Cl. botulinum* (F_0), sowie für die hitzeinduzierte Bildung von Lactulose (F_L) und Furosin (F_F)) :

konventionell

$$F_O = 8,9 \text{ min}$$

$$F_L = 33,2 \text{ s} \Rightarrow c_L = 276,4 \text{ mg/kg}$$

$$F_F = 39,1 \text{ s} \Rightarrow c_F = 125,9 \text{ mg/l}$$

turbo

$$F_O = 3,6 \text{ min}$$

$$F_L = 14 \text{ s} \Rightarrow c_L = 116,7 \text{ mg/kg}$$

$$F_F = 18,7 \text{ s} \Rightarrow c_F = 66,9 \text{ mg/l}$$

3. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Der Aufbau der Versuchsanlage ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Die Anlage besteht aus einer Homogenisiermaschine und einer nachgeschalteten, abnehmbaren, 12 m langen Rohrleitung, deren Innendurchmesser 3 mm misst. Die Stundenleistung der Homogenisiermaschine ist stufenlos von 120 bis 300 l/h regelbar und stammt von der Firma APV Gaulin GmbH. Die Hochdruckkolbenpumpe baut einen Druck von maximal 300 bar auf. Ein Vorlaufbehälter ist über eine Milchrohrverschraubung mit der Einlaufseite verbunden. Auf der Auslaufseite befinden sich hinter dem Manometer (PI₁) die beiden per Hand einstellbaren Homogenisierstufen (Homo.-Ventil 1 / Homo.-Ventil 2). Das zweite Homogenisierventil ist über eine verschraubbare Reduzierung mit der 12 m langen Rohrleitung verbunden. In dieser Reduzierung ist ein Druckaufnehmer (PI₂) eingebaut. Um eine einfache Probenahme zu ermöglichen, ist am Auslauf der Rohrleitung ein kurzer erweiterter Rohrbogen verschweißt.

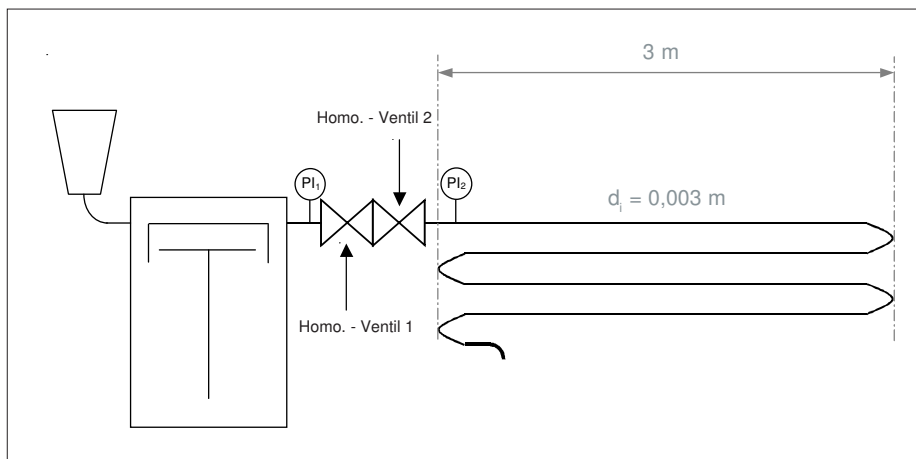


Abb. 2: Aufbau der Versuchsanlage

Mit der oben gezeigten Versuchsanlage können zwei unterschiedliche Betriebsarten hinsichtlich der Druckverhältnisse bzw. der Homogenisierung simuliert werden:

Betriebsart "Turbo-Anlage":

Bei dieser Betriebsart ist das zweite Homogenisierventil (Homo.-Ventil 2) vollständig geöffnet. Der für eine optimale Homogenisierung benötigte Gegendruck wird somit nicht mehr durch das zweite Ventil, sondern allein durch die nachgeschaltete Rohrleitung aufgebaut. Dieser Gegendruck p_G wird von dem Druckaufnehmer PI₂ erfasst. Die

Entspannung bei dieser Betriebsart erfolgt nur einmal schlagartig von dem Homogenisierdruck (PI_1 liefert p_{H1}) auf den Gegendruck nach dem ersten Homogenisierventil. Die darauffolgende Entspannung ist wesentlich langsamer und gleichmäßig über die Rohrlänge verteilt (s. Abb. 2).

Betriebsart "Konventionelle Anlage":

Diese Betriebsart stellt die Homogenisierung dar, wie sie in der Milchwirtschaft üblicherweise durchgeführt wird. Die Milch wird einem hohen Druck ausgesetzt und danach über die beiden Homogenisierventile zweistufig schlagartig auf Atmosphärendruck bzw. auf spezifischen Systemdruck entspannt. Die 12 m lange Rohrleitung ist bei dieser Betriebsart abmontiert, so dass sich folgende schematische Darstellung ergibt:

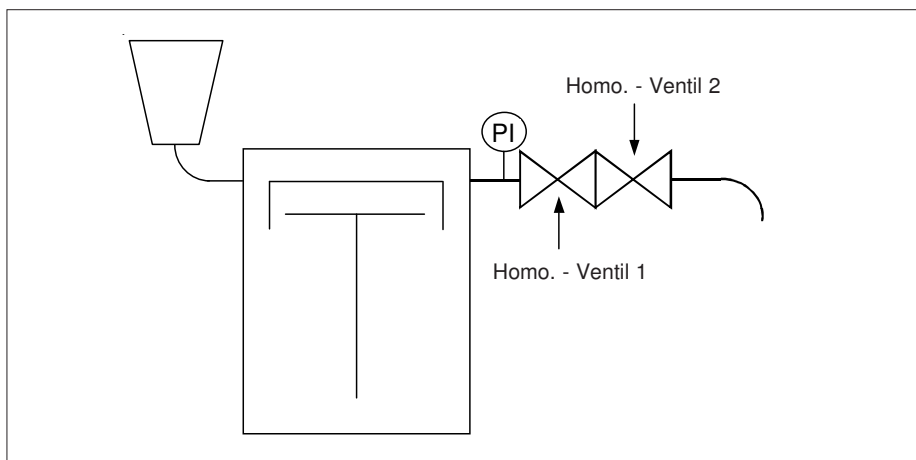


Abb. 3: Schema "Konventionelle Anlage"

Versuchsdurchführung:

1.) Turbo-Verfahren:

Nachdem die Versuchsanlage entsprechend der Betriebsart "Turbo-Anlage" hergerichtet war, wurde eine im Fettgehalt auf 3,5 % standardisierte Milch auf ca. 65 °C erhitzt und in den Vorlaufbehälter der Homogenisiermaschine gefüllt. Bei den Durchsätzen 120, 150, 180, 210, 240, 270 und 300 l/h wurde jeweils ein Homogenisierdruck (p_H) von 100, 150, 200 und 250 bar eingestellt und die dazugehörige Probe genommen. Die durch die verschiedenen Durchsätze entstehenden Drücke (p_G) vor der 12 m langen Rohrleitung (= Druckverlust über Rohrleitung) wurden über den Druckaufnehmer PI_2 registriert und festgehalten.

2.) Konventionelles Verfahren:

Die Versuchsanlage wurde auf die Betriebsart "Konventionelle Anlage" umgerüstet. Auch bei diesem Versuch wurde eine im Fettgehalt auf 3,5 % standardisierte Milch auf ca. 65 °C erhitzt und in den Vorlaufbehälter der Homogenisiermaschine gefüllt. Es wurden ebenfalls für die Durchsätze die Stufen 120, 150, 180, 210, 240, 270 und 300 l/h bzw. für die Homogenisierdrücke die Stufen 100, 150, 200 und 250 bar gewählt. Die durchsatzbedingten Gegendrücke aus dem obigen Versuch wurden mit Hilfe des zweiten Homogenisierventils und dem Manometer (PI_1) entsprechend eingestellt.

Die Bestimmung der Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung wurde unmittelbar nach den Versuchen durchgeführt, um eine Koaleszenz der Fettkügelchen auszuschließen. Diese Bestimmung wurde überwiegend mit dem Laserbeugungsspektrometer LS 230 der Firma Beckman Coulter durchgeführt. Mit dem Ziel, die vorliegenden Fettkügelchenverteilungen möglichst gut zu charakterisieren, wurde das gewogene Mittel der Volumenverteilung als Vergleichsparameter gewählt. Dieses gewogene Mittel mit der Bezeichnung d_{43} ist besonders geeignet, da die für das Aufnahmeverhalten bedeutsamen größeren Partikel stärker gewichtet werden.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das bei den Untersuchungen benutzte Laserspektrometer auch einen Teil der Caseinmicellen erfasst. Somit spiegelt der ermittelte d_{43} -Wert nicht ausschließlich die Fettkügelchenverteilung wieder. Da allerdings der Caseingehalt während der Untersuchungen konstant blieb und nur der Zerteilungsgrad der Fettkügelchen registriert und verglichen werden sollte, spielt der Einfluss durch die Erfassung der Caseinmicellen keine wesentliche Rolle.

Die erzielten d_{43} -Werte (und damit auch den Homogenisierereffekt) beider Verfahren sind in Abhängigkeit von dem Homogenisieredruck und dem Gegendruck in Abb. 4 dargestellt:

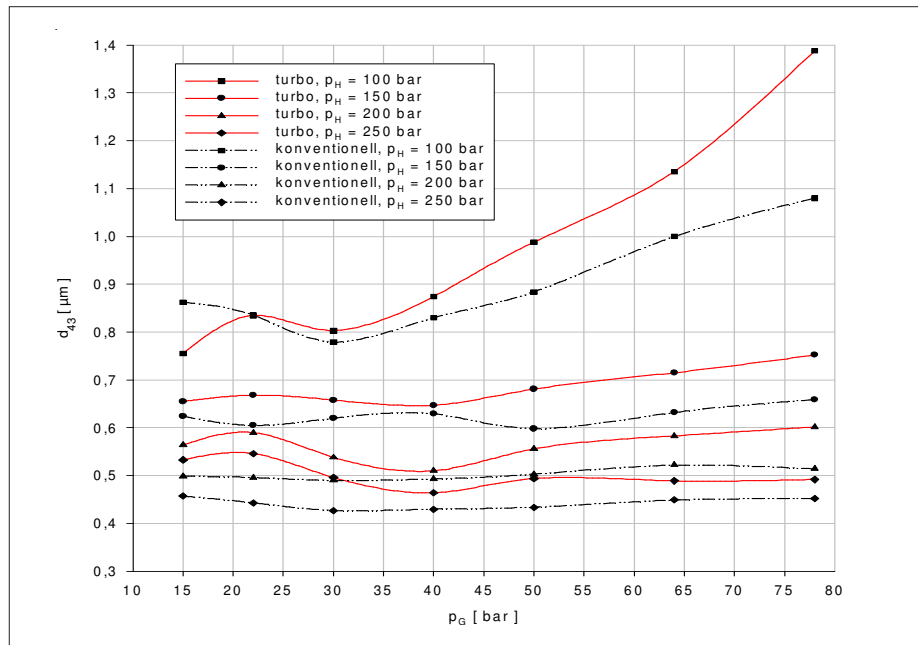


Abb. 4: d_{43} in Abhängigkeit von p_H und p_G (Konv. Verfahren u. Turbo-Konzept)

Wie aus Abb. 4 zu erkennen ist, hat der Prozessparameter Gegendruck (p_G) bei dem konventionellen Verfahren und dem Turbo-Konzept einen unterschiedlich stark ausgeprägten Einfluss auf das Homogenisierergebnis. Besonders deutlich wird dieser Einfluss bei den Homogenisieredrücken $p_H = 200$ bar und $p_H = 250$ bar:

Die d_{43} -Werte bei dem konventionellen Verfahren schwanken bei einem Homogenisieredruck von $p_H > 100$ bar über den Gegendruckbereich von $p_G = 15$ bar bis $p_G = 78$ bar

relativ wenig. Die d_{43} -Werte des Turbo-Konzeptes hingegen schwanken über diesen Gegendruckbereich um bis zu $0,1 \mu\text{m}$, wobei die niedrigsten d_{43} -Werte bei dem optimalen Gegendruck $p_G = 40 \text{ bar}$ ermittelt wurden.

Auffällig ist auch, dass der Homogenisierereffekt bei dem konventionellen Verfahren im direkten Vergleich und bei gleichen Prozessparametern überwiegend ein wenig größer ist als bei dem Turbo-Konzept. Über den betrachteten Gegendruckbereich können allerdings bei dem Turbo-Konzept durch Optimierung des Gegendruckes annähernd gleichniedrige d_{43} -Werte erzielt werden.

Für die Ermittlung der funktionellen Abhängigkeit des Homogenisierereffektes von den Stoff-, Betriebs- und Geometrieparametern wurde bei der Auswertung der Messdaten die Dimensionsanalyse eingesetzt. Sie macht es möglich dimensionslose Kenngrößen aufzustellen, mit denen dann eine empirische Beziehung für den Homogenisierereffekt abgeleitet werden kann. Diese Beziehung beschreibt den Einfluss der äußeren Parameter auf den Homogenisierereffekt bei geometrisch ähnlichen Konstruktionen.

Für beide Betriebsarten der Anlage wurde folgende den Fettkugeldurchmesser (d_{43} -Wert) beeinflussenden Maßgrößen berücksichtigt:

| <u>konventionell</u> | | <u>turbo</u> | |
|-------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| – Homogenisieredruck p_H | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}} \right]$ | – Homogenisieredruck p_H | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}} \right]$ |
| – Gegendruck p_G | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}} \right]$ | – Volumenstrom \dot{V} | $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ |
| – Volumenstrom \dot{V} | $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ | – kin. Viskosität Milch ν | $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ |
| – kin. Viskosität Milch ν | $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ | – Dichte Milch ρ | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ |
| – Dichte Milch ρ | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ | – Länge Rohrleitung L | [m] |
| | | – Innendurchmesser Rohrleitung d_i | [m] |

Nach Auswahl der Bezugsgrößen wurden über die Dimensionsanalyse folgende dimensionslosen Kenngrößen aufgestellt:

konventionell

$$\pi_1 = \frac{\dot{V}}{d_{43} \nu} \quad [1]$$

turbo

$$\pi_1 = \frac{d_{43}}{L} \quad [4]$$

$$\pi_2 = \frac{\rho v^2}{d_{43}^2 \rho_H} \quad [2]$$

$$\pi_2 = \frac{\rho_H}{L^{-4} \rho \dot{V}^2} \quad [5]$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_G}{\rho_H} = Th \quad [3]$$

$$\pi_3 = \frac{v}{L^{-1} \dot{V}} = \frac{4 L}{\pi d_i Re} \quad [6]$$

$$\pi_4 = \frac{d_i}{L} \quad [7]$$

Die dimensionslosen Kenngrößen lassen sich beliebig miteinander kombinieren. Vorfaktoren oder Exponenten liefert die Dimensionsanalyse nicht und müssen mit Hilfe der Messdaten ermittelt werden. Um die verschiedenen Kenngrößen unterschiedlich stark gewichten zu können, wurden Exponenten eingeführt und folgende Annahme aufgestellt:

konventionell: $\pi_1^A \pi_2^B = \pi_3$ [8]

turbo: $\pi_2^B \pi_3^C \pi_4^D = \pi_1^A$ [9]

Nach dem Einsetzen der Maßgrößen und empirisch ermittelten d_{43} -Werte wurde mit Hilfe einer rechnergestützten Analyse (Solver) folgende lineare Abhängigkeit der Kenngrößen π_i gefunden:

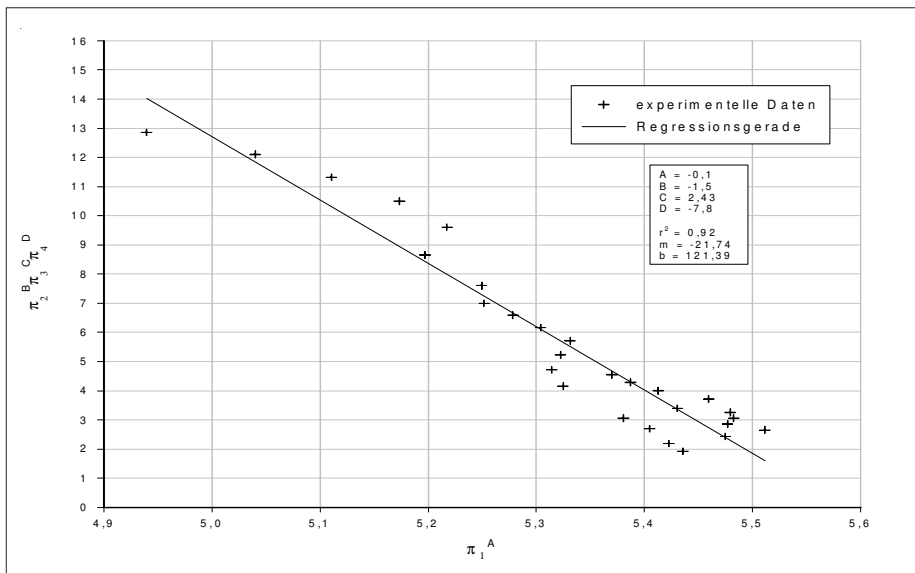


Abb. 5: Linearer Zusammenhang zwischen den dimensionslosen Kennzahlen $\pi_1 = f(p_2, p_3, p_4)$ mit $r = 1010 \text{ kg/m}^3$ und $n = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Turbo-Konzept)

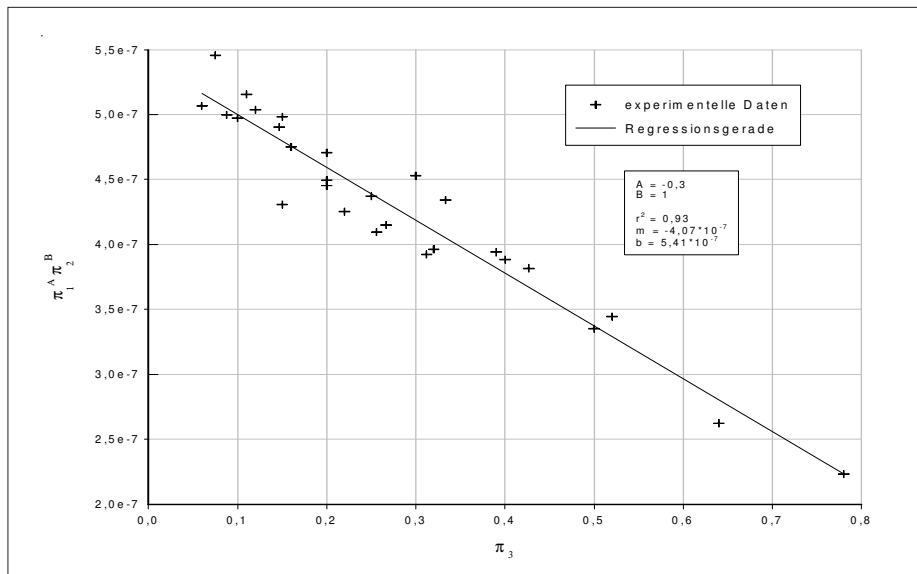


Abb. 6: Linearer Zusammenhang zwischen den dimensionslosen Kennzahlen $\pi_3 = f(\pi_1, \pi_2)$ mit $\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$ und $\nu = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Konventionelles Verfahren)

In Abb. 5 und Abb. 6 ist zu erkennen, dass die Streuung der Werte um die Regressionsgerade nur gering ist. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $r^2 = 0,92$ bei dem Turbo-Konzept und $r^2 = 0,93$ bei dem konventionellen Verfahren. Entsprechend der Regressionsgeraden ergeben sich folgende funktionelle Abhängigkeiten der d_{43} -Werte von den äußeren Parametern:

$$\text{konventionell: } d_{43} = 4980 \left[\frac{\rho v^{2,3}}{\dot{V}^{0,3} (p_H - 0,75 p_G)} \right]^{0,59} \quad [10]$$

$$\text{turbo: } d_{43} = L \left(5,58 - 0,08 \frac{L^{4,23} \rho^{1,5} \dot{V}^3}{\rho_H^{1,5} Re^{2,43} d_i^{10,23}} \right)^{-10} \quad [11]$$

Da die Differenz zwischen den empirisch ermittelten d_{43} -Werten und den nach Gleichung [10] und [11] berechneten d_{43} -Werten bei keiner betrachteten Konstellation die $0,15 \mu\text{m}$ überschreitet, wird dieses Modell als ausreichend genau bewertet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die verwendeten Funktionen nur für ähnliche Konstruktionen und Prozessparameter ausreichend genaue Voraussagen erlauben. Die Gleichungen [10] und [11] gelten für die eingestellten Drücke p_H und p_G im Bereich $p_H \in (100, 250 \text{ bar})$ und $p_G \in (15, 78 \text{ bar})$. Eine allgemeinere Gültigkeit der oben verwendeten Formeln ist an weiteren Anlagen und mit anderen Prozessparametern zu überprüfen.

5. Diskussion

Wie bereits erläutert, stellt sich das Homogenisiererergebnis, welches aus dem Konventionellen Verfahren resultiert, bei den meisten Prozessparameterkombinationen ein wenig besser dar als das Homogenisiererergebnis des Turbo-Verfahrens. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied im Homogenisierereffekt könnte eine erhöhte Traubenbildung bei dem Turbo-Konzept sein. Obwohl das zweite Homogenisierventil in dem Konventionellen Verfahren keine Zerteilwirkung auf die Fettkugeln ausübt, so scheint es doch zumindest einer Traubenbildung hinter dem ersten Homogenisierventil entgegen zu wirken. Die evtl. höhere Anzahl an Trauben resultierend aus dem Turbo-Verfahren wird von dem Laserbeugungsspektrometer erfasst und als größere Partikel registriert. Diese größeren Partikel lassen den aus der Partikelverteilung errechneten d_{43} -Wert ansteigen. Die meisten d_{43} -Werte, die aus den Versuchen mit Homogenisierdrücken von $p_H = 150$ bar, $p_H = 200$ bar und $p_H = 250$ bar resultieren, liegen unter $0,7 \mu\text{m}$. Die DLVO-Theorie (9) besagt zwar, dass Fettkugeln mit einem Durchmesser von unter $0,7 \mu\text{m}$ nicht zur Traubenbildung fähig sind, da einmal gebildete Zusammenlagerungen durch die Brown'sche Molekularbewegung wieder getrennt werden, aber es muss berücksichtigt werden, dass der d_{43} -Wert ein rechnerisch zusammengefasster Wert ist, der zusätzlich durch aufgeführte Messmethodik geringfügig nach unten verschoben wird.

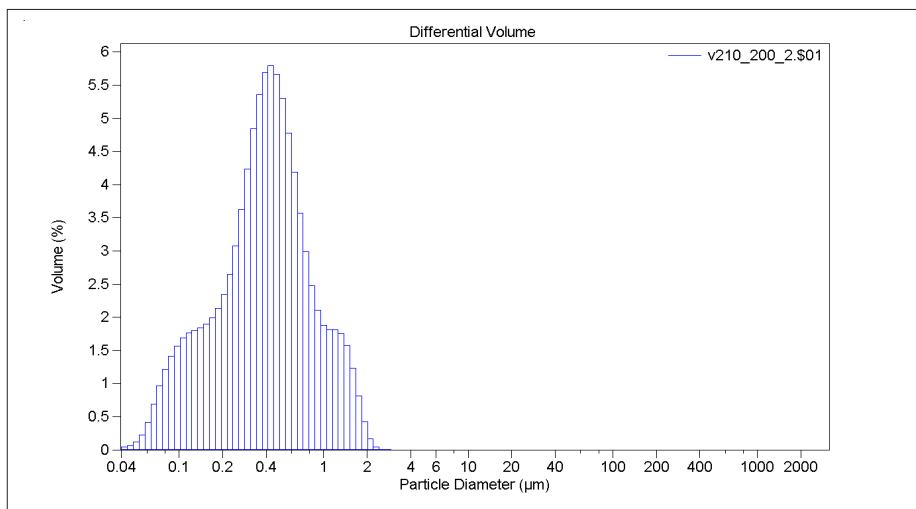


Abb. 7: Volumenbezogene relative Häufigkeit für die betreffende Partikeldurchmesserklasse als Funktion des Partikeldurchmessers (Konventionelles Verfahren, $p_H = 200$ bar, $p_G = 40$ bar)

Wird hingegen die gesamte Partikelverteilung (vgl. Abb. 7) betrachtet so wird deutlich, dass durchaus Fettkugeln existieren, die zu einer Zusammenlagerung fähig sind.

Mit einer Erweiterung dieser "Traubenbildungs-Theorie" lassen sich auch die niedrigen d_{43} -Werte bei den Turbo-Konzept-Versuchen und den Druckkombinationen $p_H = 200$ bar / $p_G = 40$ bar und $p_H = 250$ bar / $p_G = 40$ bar erklären. Durch diese bestimmten Homogenisierdruck -Gegendruck-Kombinationen ergeben sich vermutlich direkt hinter dem Homogenisierventil Strömungsbedingungen, die eine verminderte Traubenbildung zur Folge haben. Somit ist bei diesen Drücken eine Wirkung ähnlich der oben erwähnten

Wirkung des zweiten Homogenisierventils zu bewirken. Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht mehr möglich, diese Theorie zu be- oder widerlegen. In der Dimensionsanalyse wurden die Strömungsbedingungen innerhalb der 12 m langen Rohrleitung in Form der Reynolds-Zahl einbezogen. Allerdings konnten die Strömungsverhältnisse, die nur direkt hinter dem ersten Homogenisierventil herrschen und evtl. die Traubenbildung beeinflussen, nicht berücksichtigt werden.

Eine vollständige Maßstabsübertragung der Ergebnisse auf Produktionsanlagen ist nur teilweise möglich, da der Homogenisierereffekt bei dem Hochdruck-Homogenisieren in Turbo-Anlagen von einer Vielzahl weiterer, hier nicht untersuchten Faktoren abhängt. Zu diesen Faktoren zählen z.B. der Fettgehalt der Milch, die Homogenisierereffekttemperatur und die Düsenkonstruktion. Obwohl diese Prozessparameter in den eigenen Untersuchungen nicht variiert worden sind, so lassen sich doch eindeutige Tendenzen ableiten. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass das Homogenisieren in Turboanlagen mit nur einer Homogenisierstufe durchaus zu gleichgroßen Homogenisierereffekten führen kann, wie sie mit konventionellen Anlagen erzielt werden. Es hat sich gezeigt, dass der Prozessparameter Gegendruck ein sehr wesentlicher Faktor in der Optimierung des Homogenisiererergebnisses bei dem Turbo-Verfahren darstellt. Da bei Turbo-Anlagen der Gegendruck hinter dem Homogenisierventil größtenteils durch die nachgeschalteten Erhitzerabteilungen aufgebaut wird, muss schon während der Konstruktionsplanung der Rohrbündel der "optimale Gegendruck" angestrebt werden.

Durch die in den Versuchen benutzte Rohrleitung mit einem konstanten Innendurchmesser ergab sich über die gesamte Länge ein konstanter Druckabfall, den es bei Produktionsanlagen schon konstruktionstechnisch nicht gibt. Allerdings wird diesem Unterschied nur eine untergeordnete Bedeutung für das Homogenisiererergebnis zugeschrieben.

In der in den eigenen Versuchen benutzten Rohrleitung entstanden während der gesamten Versuchsphase keine Ablagerungserscheinungen aufgrund von außen zugeführter Wärmeenergie. Die Ablagerungen an den Innenwänden der Rohrbündelwärmetauscher von Produktionsanlagen müssen bei der Berechnung des Gegendruckes ebenfalls berücksichtigt werden. Um während der Produktionsphase einen konstanten optimalen Gegendruck hinter dem Homogenisierventil zu gewährleisten, lässt sich gegebenenfalls der zu niedrige Gegendruck zur Zeit des Produktionsbeginns durch ein Druckhalteventil im hinteren Anlagenbereich kompensieren.

Eine Veränderung der Anlagekosten oder der Betriebskosten, die in der Verwendung des Turbo-Verfahrens begründet wäre, ist nicht zu erkennen, da die Konstruktion weitestgehend der Konstruktion einer konventionellen Anlage entspricht und kein höherer Homogenisierdruck benötigt wird.

Bei der Verwendung einer Turbo-Anlage ist möglicherweise folgendes Potential zur Senkung der Investitionssumme gegeben: Durch die nicht benötigte zweite Homogenisierstufe sind die Kosten der Homogenisiermaschine niedriger.

Eine Veränderung der Energiekosten, die durch das Betreiben einer Anlage nach dem Turbo-Konzept begründet ist, wird als unwahrscheinlich bzw. geringfügig eingestuft.

Der bedeutendste Vorteil, der durch die Verwendung des Turbo-Verfahrens auftritt, wird in der Herstellung eines sensorisch hochwertigeren Produktes gesehen. Mit geeigneten Marketingmaßnahmen ließen sich ausgewählte positive Konsequenzen, die sich aus der verminderten thermischen Belastung (z.B.: "Vitaminschonende Behandlung", "besserer Geschmack") an den Verbraucher vermitteln. Durch die bei der Verfolgung des Turbo-

Konzeptes herabgesetzte thermische Belastung ist mit einer Verringerung des Kochgeschmackes (z.B. bei UHT-Milch) zu rechnen, worin einer der Hauptvorteile des Turbo-Verfahrens liegt.

Eine sensorische Beurteilung während der eigenen Untersuchungen war nicht möglich, da in den Versuchen keine Wärmeenergie von der Außenwand der Rohrleitung zugeführt wurde, mit denen gegebenenfalls die Simulation der Temperatur-Zeit-Bedingungen von Produktionsanlagen möglich wäre.

6. Literatur

- (1) Kurzhals, H.-A.: Untersuchungen über die physikalisch-technischen Vorgänge beim Homogenisieren von Milch in Hochdruck-Homogenisiermaschinen (1977)
- (2) Treiber, A. : Zum Einfluss der Kavitation bei der Hochdruckhomogenisation von Öl-in -Wasser-Emulsionen (1979)
- (3) Walstra, P.: Neth. Milk Dairy **23** 290-292 (1969)
- (4) Loo, C.C. , Carleton, W.M.: Further Studies of Cavitation in the Homogenization of milk products. J. Dairy Science **36** (1) 64-75 (1953)
- (5) Holley, W., Bauer, W.: Hochdruckhomogenisieren: Allgemeine Gesichtspunkte und spezielle Homogenisierbedingungen für Milchprodukte. Deutsche Molkerei Zeitung **109** (44) 1411-1423 (1988)
- (6) Kiefer, P.: Der Einfluß von Scherkräften auf die Tröpfchenzerkleinerung beim Homogenisieren von Öl-in-Wasser-Emulsionen in Hochdruckhomogenisierdüsen (1977)
- (7) Phipps, L. W. : Mechanism of Oil Droplet Fragmentation in High Pressure Homogenizers, Nature **233** 617-619 (1971)
- (8) Kiesner, C.: Verarbeitungstechnik von Milch und Milcherzeugnissen. Aktuelle Entwicklungen. Deutsche Molkerei Zeitung **122** (6) 236-241 (2001)
- (9) Verwey, E.I.W., Overbeek, J.T.G.: Theory of the stability of lyophobic colloids. Amsterdam: Elsevier Publ. Comp. 1948

7. Zusammenfassung

Kiesner, Ch., Eschger, M., Wüst, E.: **Veränderung des Homogenisiergrades bei Anwendung von Homogenisiermaschinen in Erhitzeranlagen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte **55** (2) 107-119 (2003)

21 Milchwirtschaftliche Technologie (Homogenisierung, Turbo-Modul)

Ziel dieser Arbeit war, den Homogenisierereffekt, der bei der Verwendung des Turbo-Verfahrens auftritt, zu untersuchen und das Homogenisiererergebnis dieses Verfahrens mit dem Homogenisiererergebnis des konventionellen Verfahrens zu vergleichen. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Verfahren liegt in der Konstruktion der Rohrbündel innerhalb der Röhrenwärmeübertrager. Bei den Turbo-Modulen werden Röhren eingesetzt, deren Innendurchmesser wesentlich kleiner sind als bei der konventionellen Anlage, woraus eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit (daher der Begriff "Turbo") resultiert.

Es wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, die es ermöglicht, die Druckverhältnisse, wie sie in Produktionsanlagen herrschen, zu simulieren. Um die aus den zwei unterschiedlichen Verfahren resultierenden Homogenisiergrade zu vergleichen, wurde eine Teilchengrößenanalyse durchgeführt und das gewogene Mittel der Volumenverteilung (d_{43} -Wert) als Vergleichsparameter ausgewählt und bestimmt.

Mit Hilfe der Dimensionsanalyse konnte für die Versuchsanlage die Abhängigkeit des Homogenisiererergebnisses von den maßgeblichen Parametern ermittelt werden. Anhand von partiellen Darstellungen stellte sich heraus, dass sich bei beiden Verfahren das Homogenisiererergebnis mit zunehmendem Homogenisierdruck und optimiertem Gegendruck (Druck hinter dem ersten Ventil) verbessert. Interessant hierbei ist, dass der Gegendruck bei dem Turbo-Verfahren einen stärkeren Einfluss auf das Homogenisiererergebnis hat als bei dem Konventionellen Verfahren. Obwohl die aus dem Turbo-Verfahren resultierenden Homogenisiererergebnisse bei den meisten Druckkombinationen unbedeutend schlechter als bei dem Konventionellen Verfahren ausfielen, ist es mit dem Turbo-Konzept möglich, durch Optimierung des Gegendruckes gleich hohe Homogenisiergrade zu erreichen, ohne den Homogenisierdruck erhöhen zu müssen.

Wenn berücksichtigt wird, dass bei diesem neuen Verfahren keine höheren Kosten erkennbar sind und ein sensorisch hochwertigeres Produkt entsteht, so ist ein Potential zur Durchsetzung des Turbo-Konzeptes gegeben.

Summary

Kiesner, Ch., Eschger, M., Wüst, E.: **Modifying the homogenization grade at using homogenizers in heating plants with high flow velocity.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 55 (2)107-119 (2003)

21 Dairy technology (homogenization, Turbo module)

The goal of this study was to investigate the homogenizing effect occurring at using the turbo method, and to compare the homogenization result with that of conventional methods. The essential difference between the two methods lies in the construction of the tube assembly within the scraping heat exchanger. For the turbo modules tubes with a considerably smaller inner diameter than that of conventional plants, thus resulting into an increased flowing velocity (explaining the term „turbo“).

An experimental plant was constructed allowing to simulate the pressure conditions of production plants. For comparing the homogenization grades resulting from the two different methods a particle size analysis was performed and the weighted average of the volume distribution (d_{43} -value) selected and defined as comparative parameter.

By applying the dimension analysis it has been possible to detect the dependence of the homogenization result from the relevant parameters.

Partial displays revealed that for both methods, the homogenization result is improved with increasing homogenization pressure and optimized counter pressure (pressure behind the first valve). Of interest is the fact that the counter pressure for the turbo method has a stronger impact on the homogenization result than for the conventional method. Although the homogenization results from the turbo method were unsubstantially inferior for most of the pressure combinations the turbo concept allows to reach equally high homogenization grades by optimizing the counter pressure without having to increase the homogenization pressure.

Taking into account that no higher costs are expected with this new method, and that a sensorically high-quality product is created the potential for implementing the turbo concept is given.

Résumé

Kiesner, Ch., Eschger, M., Wüst, E.: **Modification du degré d'homogénéisation en utilisant des appareils homogénéisants dans des installations de pasteurisation à des vitesses d'écoulement élevées.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 55 (2) 107-119 (2003)

21 Technologie laitière (homogénéisation, modèle turbo)

Le but de cette étude était d'examiner l'effet d'homogénéisation produit lors de l'application de la méthode turbo et de comparer le résultat d'homogénéisation à celui des méthodes conventionnelles. Les deux méthodes se différencient essentiellement par la construction des faisceaux tubulaires dans l'échangeur thermique tubulaire. Pour les modules turbo on utilise des tubes dont le diamètre intérieur est nettement plus petit que celui des installations conventionnelles, menant ainsi à une vitesse d'écoulement élevée (ce qui explique le terme „turbo“).

On a construit une installation d'essai qui permet de simuler les conditions de pression des installations de production. Afin de pouvoir comparer les degrés d'homogénéisation des deux méthodes différentes on a fait une analyse de la taille des particules et on a choisi et déterminé la moyenne pondérée de la distribution du volume (valeur d_{43}) comme paramètre de comparaison.

L'analyse de dimension permet de déterminer la dépendance du résultat d'homogénéisation des paramètres relevants. Des représentations partielles ont révélé que pour les deux méthodes le résultat d'homogénéisation s'améliore en présence d'une pression d'homogénéisation croissante et une contre-pression optimisée (pression derrière la première valve). Il est d'intérêt que la contre-pression exerce une plus grande influence sur la méthode turbo que sur les méthodes conventionnelles. Bien que les résultats d'homogénéisation pour la plupart des combinaisons de pression soient un peu moins bons pour la méthode turbo que pour les méthodes conventionnelles, le concept turbo permet, en optimisant la contre-pression, d'obtenir des degrés d'homogénéisation élevés égaux sans devoir augmenter la pression d'homogénéisation.

Si l'on tient compte que ce concept ne cause pas de coûts élevés et crée un produit de haute qualité du point de vue sensorique, il existe un potentiel de réaliser le concept turbo.