



Bericht

Berichtszeitraum: 01.07.2008 bis 30.06.2010

„Einsatz pulsierender Strömung zur Verbesserung des Foulingverhaltens an wärmeübertragenden Flächen in der milchverarbeitenden Industrie„

Kennziffer: 2772

Doktorand: Cristiane Boxler, M.Eng.

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl
Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik
Technische Universität Braunschweig

Januar 2011

1 Einleitung

Die Bildung von Ablagerungen bei der thermischen Behandlung von Milch oder Milchprodukten, auch als Fouling bezeichnet, ist ein ernsthaftes Problem in der milchverarbeitenden Industrie. Diese Foulingschichten sind aufgrund der durch sie verursachten Verringerung des Wärmedurchgangs und der Erhöhung des Druckverlustes in Erhitzungsanlagen von großer Bedeutung. Zudem ist aufgrund der strengen Anforderungen an Qualität und Hygiene [LMHV, 1997; MilchHQV, 1995] eine regelmäßige gründliche Reinigung notwendig. Neben Produktionsausfällen durch Stillstandzeiten entstehen dadurch Kosten für Reinigungsmittel, Spülwasser, die Entsorgung der verwendeten Reinigungslösung und durch zusätzlichen Energieverbrauch. Die Vermeidung von Fouling sowie die Verringerung der zur Reinigung eingesetzten Ressourcen stehen daher im Mittelpunkt der technologischen Weiterentwicklung.

Milchfouling wird in der Literatur vielfach beschrieben [Bansal und Chen, 2006]. Es sind jedoch noch keine nachhaltig wirksamen und universell anwendbaren Ansätze und Verfahrensweisen bekannt, die gleichzeitig vermindertes Fouling wie verbesserte Reinigungseigenschaften adressieren.

Ein betrieblicher Ansatz ist die Erhöhung der Wandschubspannung durch Steigerung der auf die Ablagerungen wirkenden mechanischen Strömungskräfte. Ein wesentlicher Einfluss auf das Fouling bzw. die Reinigungszeit hat die Strömungsgeschwindigkeit. Eine stationär und konstant hohe Strömungsgeschwindigkeit ist jedoch aus technischen und betriebswirtschaftlichen Gründen oftmals nicht sinnvoll. Zweckmäßig erscheint eine pulsierende Strömung, also eine temporäre Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, als alternativer Lösungsansatz unter Ausnutzung des Strömungsregimes.

2 Pulsierende Strömung

Eine pulsierende Strömung entsteht, wenn einer stationären Grundströmung eine oszillierende Komponente überlagert wird. Charakteristisch für die pulsierende Strömung ist ein Anstieg der Geschwindigkeit in der wandnahen Oszillationsgrenzschicht. Durch die kurzzeitige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Pulsation werden die auf die Belagsoberfläche wirkenden Scherkräfte erhöht, was die Bildung einer Ablagerung vermindert und eine verstärkte Abtragung der Schmutzschicht begünstigt. So kann eine pulsierende Strömung die Bildung der Foulingschicht verhindern oder das Wachstum verringern [Gillham, 1997]. Die Pulsationsanregung mittels oszillierendem Kolben ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Beschreibung der Pulsationsströmung erfolgt als Produkt zweier Komponenten, der mittleren stationären Geschwindigkeit w_{stat} und einem überlagerten oszillierenden Anteil w_{osc} . Die mittlere Geschwindigkeit für ein Oszillationsintervall t_{osc} ist definiert als

$$\bar{w} = \frac{1}{t_{osc}} \int_0^{t_{osc}} w(t) dt \quad (1)$$

mit der zeitabhängigen Geschwindigkeit

$$w(t) = w_{stat} + w_{osc}(t) \quad (2)$$

Abb. 2 zeigt die Komponenten einer Pulsationsströmung.

Die Intensität einer Pulsationsströmung wird durch die dimensionslose Größe, der Welligkeit W , beschrieben. Diese ergibt sich aus dem Quotienten der maximalen, oszillierenden Geschwindigkeit $w_{os,max}$ und der mittleren Geschwindigkeit:

$$W = \frac{w_{os,max}}{\bar{w}} \quad (3)$$

Höhere Welligkeiten können zur Ablösung der laminaren Grenzschicht und zur Bildung von Wirbeln führen. Welligkeiten $W > 1$ führen im Rohr zu einer zeitweisen Strömungsumkehr in der Nähe der Wand [Dettman, 1991; Augustin, 2010].

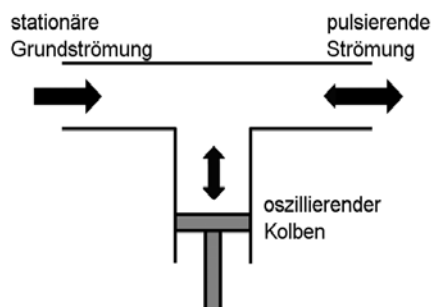


Abb. 1 Pulsationsanregung mit Kolbenhub

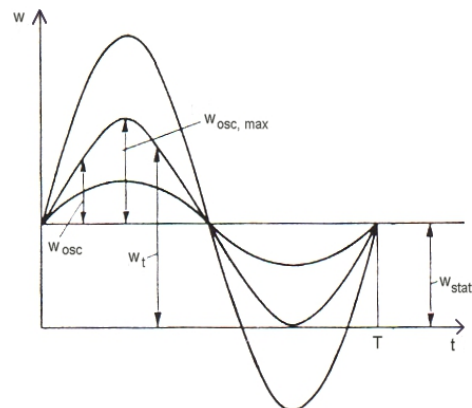


Abb. 2 Geschwindigkeit einer sinusförmigen Pulsation für ein Oszillationsintervall $T (= 2\pi)$

Der Einsatz der periodischen Pulsationstechnik zur Verbesserung des Reinigungsverhaltens von Molkeproteinablagerungen in einem geraden Rohrsegmente konnte nachgewiesen werden [Bode et al. 2006, Gillham 2000]. Gillham [Gillham 1997] hat den Einfluss der Geschwindigkeitskomponenten und der Temperatur auf Molkeproteinablagerungen in einer Laboranlage (Rohrinnendurchmesser 6 mm) untersucht. Er konnte zeigen, dass die pulsierende Strömung die Reinigungsdauer um bis zu 50% senkt. Seine Arbeit befasste sich mit der Pulsation in dem Frequenzintervall 0,1 bis 5 Hz und einer Amplitude von 1 bis 3 mm. In der Arbeit von Bode [Bode et al., 2006] wurden die stationäre Geschwindigkeit (0,1 – 0,3 m/s) sowie der überlagerte oszillierende Anteil (0,1 – 0,6 m/s) bei einer Frequenz von 1,68 Hz in einem Ringspalt mit einem Außendurchmesser von 25 mm und einem Innendurchmesser von 15 mm variiert. Die Ergebnisse der Arbeit stimmen gut mit den Ergebnissen von Gillham [Gillham, 1997] überein.

Blel et al. [Blel, 2009a; Blel, 2009b] haben die Reinigung einer mikrobiologischen Verschmutzung mittels pulsierender Strömungen untersucht. Die Untersuchungen waren auf die Messung der Wandschubspannungsverteilung an geometrischen Unstetigkeiten sowie auf die Abreinigung fokussiert.

Der Einfluss einer niedrigen Frequenz (2,4 Hz) auf verschiedene komplexere Strömungsgeometrie, wie sprunghaften und kontinuierlichen Querschnittserweiterungen, konnte mittels CFD-Simulation sowie Reinigungsversuchen an den Stoffsystemen Gelatine und Stärke verifiziert werden [Augustin et al., 2010].

Die Überlagerung einer stationären Strömung mit einer langsamen Oszillation (1,68 Hz) wurde eingesetzt zur Verringerung des Kristallisationsfouling [Augustin et al., 2001]. Es wurden Foulingversuche mit einer wässrigen CaSO_4 -Lösung ohne und mit Pulsation durch-

geführt. Da die Versuche bis zu 400 h laufen und aus ökonomischen und technischen Gründen eine kontinuierliche Pulsation energetisch aufwendig wäre, wurden Versuche mit zwei unterschiedliche Anzahl von Hüben (1 und 10 Hübe) und unterschiedliche Zeitabständen zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsationshüben (10 s und 1 – 30 min) bei einer konstanten stationären Geschwindigkeit (0,5 m/s) und bei einer konstanten oszillierenden Geschwindigkeit (0,25 m/s) durchgeführt. Die Variation des Zeitintervalls zwischen den Pulsationsphasen brachte keine vollständige Verhinderung des Kristallwachstums, aber eine deutliche Verzögerung. Mit der Erhöhung der Anzahl aufeinanderfolgender Pulse wurde eine weitere Verringerung der Ablagerung erreicht [Augustin et. al., 2001].

Der Einsatz der Pulsation zur Verminderung des Foulings von Lebensmittelablagerungen sowie der Einsatz der Pulsation in Platten mit Winkel-Wellen-Prägung wurde noch nicht untersucht.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekt soll in einer Plattenwärmeübertrager-Technikumsanlage der Einfluss einer Pulsationsströmung auf das Ablagerungsverhalten von Molkeprotein systematisch untersucht werden, um ein verbessertes Verständnis zur Wirkung und optimalen Anwendung der periodischen Pulsationstechnik zu erhalten.

3 Versuchsdurchführung

Die Schlüsselkomponente für die Ablagerungsbildung beim Milchfouling ist das Molkeprotein β -Lactoglobulin [Bansal und Chen, 2006]. Außerdem wird beim Erhitzen das Gleichgewicht des Stoffsystems zum unlöslichen Calciumphosphat hin verschoben. Dies führt zum Anlagern an wärmeübertragende Flächen als Salz oder als Konglomerat gemeinsam mit den Proteinen. Daher wurde als Modellstoffsystem eine Molkeprotein/Milchsatz-Lösung eingesetzt. Zur Beurteilung des Foulingverhaltens des Molkeproteins mittels einer pulsierenden Strömung wurde die im Folgenden beschriebene und in Abb. 3 dargestellte Versuchsanlage eingesetzt. Der Pulsationserfolg konnte sowohl durch die Abnahme des Foulingwiderstandes im Verlauf des Versuches als auch durch eine Konzentrationsbestimmung der schichtbildenden Komponente in der Reinigungslösung quantifiziert werden.

Das vorerwärmte, im Behälter B1 vorgelegte Versuchsmedium wird mittels einer Hochdruckkreiselpumpe P1 durch den Plattenwärmeübertrager W1 gefördert. Der Wärmeübertrager (Schaltung 1x1/2x1) wird im Gegenstrom von Heißwasser aus dem Behälter B2 durchströmt, um das Versuchsmedium über die Denaturierungstemperatur des Proteins (ca. 75°C) zu erhitzen. Durch die Temperaturdifferenz zwischen dem Medium und der Oberfläche baut sich in dem Wärmeübertrager W1 eine Foulingschicht auf. Das Heißwasser wird in einem Kreislauf mittels eines Tauchsieders temperiert. Das Versuchsmedium wird dann in dem Plattenwärmeübertrager W2 abgekühlt, bevor es in den Behälter B1 zurückgeführt wird. Der Wärmeübertrager W2 wird im Gegenstrom mit Kühlwasser betrieben.

Die Volumenstromregelung erfolgt über ein elektrisch angesteuertes Motorstellventil (V5 und V13). Der Volumenstrom wird mit Hilfe von induktiven Durchflussmessern (FRIC1 und FRIC2) bestimmt. Mit den Thermoelementen TIR1 und TIR4 des Produktstromes sowie durch die Thermoelemente TIR3 und TIR5 des Heizwasserstromes kann die Wärmebilanz um den isolierten Plattenwärmeübertrager W1 heizwasser- wie produktseitig bestimmt werden.

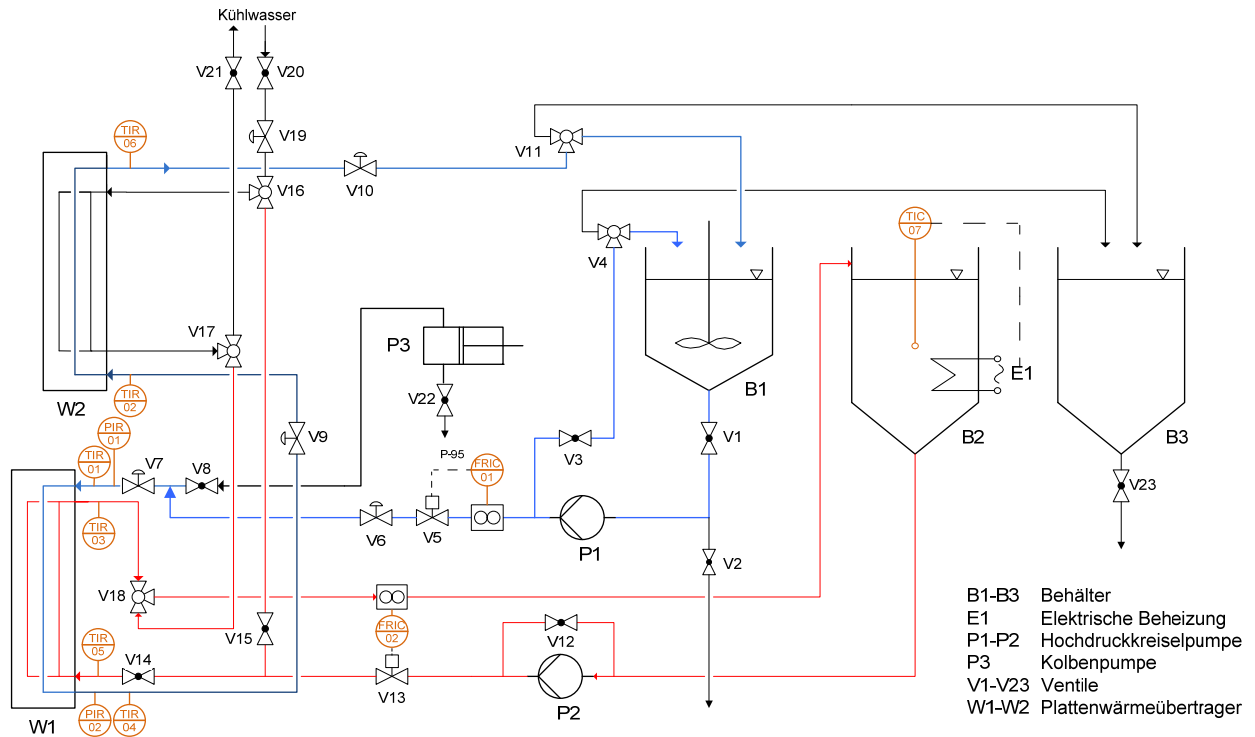


Abb. 3: Verfahrensfliessbild der Versuchsanlage zur Untersuchung des Molkeprotein-fouling bei Pulsation

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Betriebsparameter zusammenfassend aufgelistet.

Tab. 1 Betriebsparameter zur Untersuchung des Einflusses der Pulsation

Parameter	Heizmedium	Produkt
Versuchslösung	Wasser	55 g/l WPI in SMUF* gelöst
Initialer pH-Wert	--	6,75 ± 0,05
Initiale Eintrittstemperatur	87 ± 1°C	62 ± 2°C
Initiale Austrittstemperatur	85 ± 2°C	85 ± 1°C
Wärmestromdichte	25 ± 2 kW/m ²	22 ± 2 kW/m ²
Volumenstrom	1,7 m ³ /h	0,09 m ³ /h
w _{stat}	0,95 m/s	0,1 m/s
Re	15.000	870
Versuchsdauer	--	2 Stunden

*WPI = whey protein isolate; SMUF = simulated milk ultrafiltrate

Eine kontinuierliche Oszillation wurde mittels Kolbenpumpe vor dem Wärmeübertrager W1 auf der Produktseite eingebracht. Die Saugseite der Pumpe wurde verschlossen und somit

wurde die Überlagerung der stationären Strömung mit einer Oszillation ermöglicht. Die Amplitude wurde durch den verstellbaren Kolbenhub und die Frequenz durch einen elektronischen Taktgeber eingestellt. Somit konnte die Welligkeit variiert werden, siehe Tab. 2.

Nach dem Foulingversuch wurden die verschmutzten Platten ausgebaut und durch saubere Platten ersetzt. Anschließend wurde die Anlage mit 0,5 Gew.-% NaOH bei 50°C für 1 Stunde gereinigt. Die verschmutzten Platten wurden in einer 1 Gew.-% H₃PO₄-Lösung sowie in einer 1 Gew.-% NaOH-Lösung bei 50°C jeweils für 1 Stunde eingelegt. Die Reinigungslösungen wurden dann hinsichtlich Stickstoff- und gesamtem Mineral- sowie Calcium- und Phosphatgehalt analysiert.

Tab. 2 Welligkeiten bei variierten Pulsationsparameter

		Frequenz [Hz]		
		0,1	1	2
Amplitude [mm]	2,5	0,1	1,3	2,4
	5	0,2	2,5	5

4 Versuchsauswertung

4.1 Pulsierende Strömung

Die oszillierende Bewegung resultiert aus der Bewegung des Kolbens und wird durch die Kinematik des Pumpenantriebs beschrieben [Eifler et al., 2009]:

$$w_k(t) = \frac{s}{2} \omega (\sin \omega t + \frac{\lambda_s}{2} \sin 2 \omega t) \quad (4)$$

Mit der Annahme, die Flüssigkeit sei inkompressibel, kann die oszillierende Anteil der Geschwindigkeit in dem Spalt zwischen den Platten aus Gl. (4) und aus der Kontinuitätsgleichung $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho V)$ mit Gl. (5) berechnet werden:

$$w_{osc}(t) = \frac{w_k(t) A_K}{A_{Spalt} \eta} \quad (5)$$

Die maximale oszillierende Geschwindigkeit hängt von dem Produkt zwischen den Pulsationsparametern Amplitude s und Frequenz f ab:

$$w_{osc,max} = \frac{s \pi f A_K}{A_{Spalt}} \quad (6)$$

4.2 Foulingwiderstand

Der von Heizmedium durch die Platte an dem Produkt abgegebene Wärmestrom lässt sich unter Vernachlässigung der Wärmeverluste an die Umgebung bestimmen:

$$\dot{Q}_H(t) = \dot{m}_H c_{p,H} \Delta T_H = \dot{Q}_P(t) = \dot{m}_P c_{p,P} \Delta T_P = \dot{Q}(t) \quad (7)$$

Der Foulingwiderstand R_f ergibt sich aus der Differenz der Wärmedurchgangswiderstände bei verschmutzter und sauberer wärmeübertragender Fläche:

$$R_f(t) = \frac{1}{k_f(t)} - \frac{1}{k_0} \quad (8)$$

Bei der Gesamtbilanzierung des Plattenwärmeübertragers kann der Wärmestrom \dot{Q} vereinfacht beschrieben werden durch:

$$\dot{Q} = kA \frac{(T_{H,aus} - T_{P,ein}) - (T_{H,ein} - T_{P,aus})}{\ln\left(\frac{T_{H,ein} - T_{P,aus}}{T_{H,aus} - T_{P,ein}}\right)} \quad (9)$$

Somit kann der Foulingwiderstand integral über die Temperaturmessung bei konstantem Eingangsvolumenstrom sowie bei konstanter Eintrittstemperatur des Heizmediums aus der zeitlichen Änderung des Wärmedurchgangskoeffizient k erfasst werden.

$$R_f(t) = \frac{1}{k_f(t)} - \frac{1}{k_0} = \frac{A \Delta T_{ln,f}(t)}{\dot{Q}_f(t)} - \frac{A \Delta T_{ln,0}}{\dot{Q}_0} \quad (10)$$

4.3 Verbesserung des Wärmeübergangs bei pulsierender Strömung

Der gesamte Wärmedurchgangswiderstand ist bei der Betrachtung sauberer Oberflächen eine Summe von fünf Einzelwiderständen, nämlich der äußeren und inneren konvektiven Wärmeübergangswiderstände, des Wärmeleitwiderstandes durch die Platte und die Foulingwiderstände auf den Oberflächen der Heiz- bzw. Produktseite ($R_{f,H}$ bzw. $R_{f,P}$). Da die wärmeübertragende Fläche für die Plattenwärmeübertrager unverändert bleibt, kann der Wärmedurchgangskoeffizient für einen Spalt durch Gl. (11) beschrieben werden:

$$\frac{1}{k_{Spalt}(t)_{\pm}} = \frac{1}{\alpha_H(t)} + \frac{1}{\alpha_P(t)} + \frac{\delta_{Platte}}{\lambda_{Platte}} + R_{f,H} + R_{f,P} \quad (11)$$

Bei der Betrachtung sauberer Oberflächen sind die Terme $R_{f,H}$ und $R_{f,P}$ gleich null.

Der Wärmeübergangskoeffizient des Heizmedium (α_H) ist über die Versuchsdauer näherungsweise konstant und wird mittels der Berechnung der Nusseltzahl mit nachstehender Beziehung [Wang et al. 2007] bestimmt:

$$Nu = \frac{\alpha_H d_h}{\lambda} = 0,72 Re^{0,59} Pr^{0,4} \phi^{0,41} \left(\frac{\beta}{30}\right)^{0,66}, \text{ für } 10^3 < Re < 4 \times 10^3 \quad (12)$$

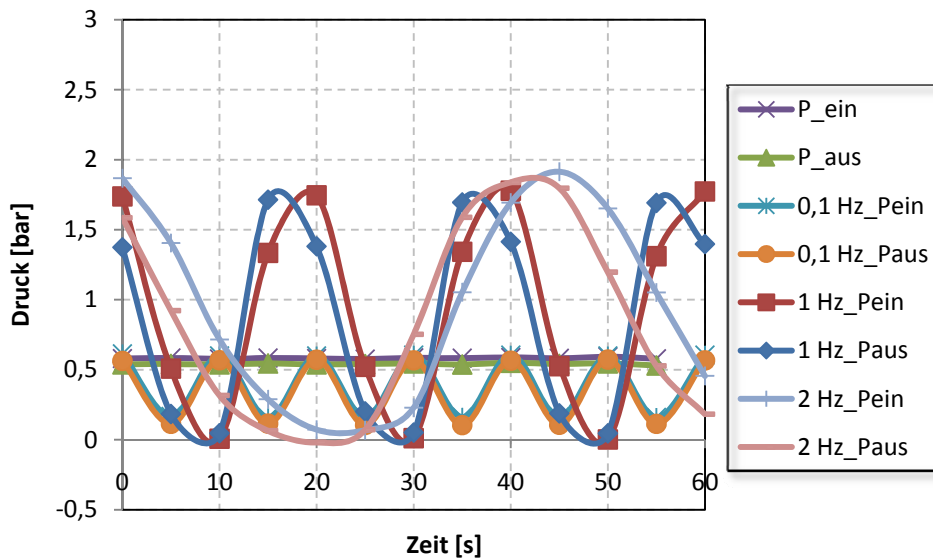
Zur experimentellen Bestimmung des Einflusses der Pulsation auf den sauberen Wärmeübergang auf der Produktseite (α_P) wurde Wasser als Versuchsmedium mit den gleichen Betriebsbedingungen wie bei den Foulingversuchen (siehe Tab. 1 und Tab. 2) verwendet.

5 Ergebnisse und Diskussion

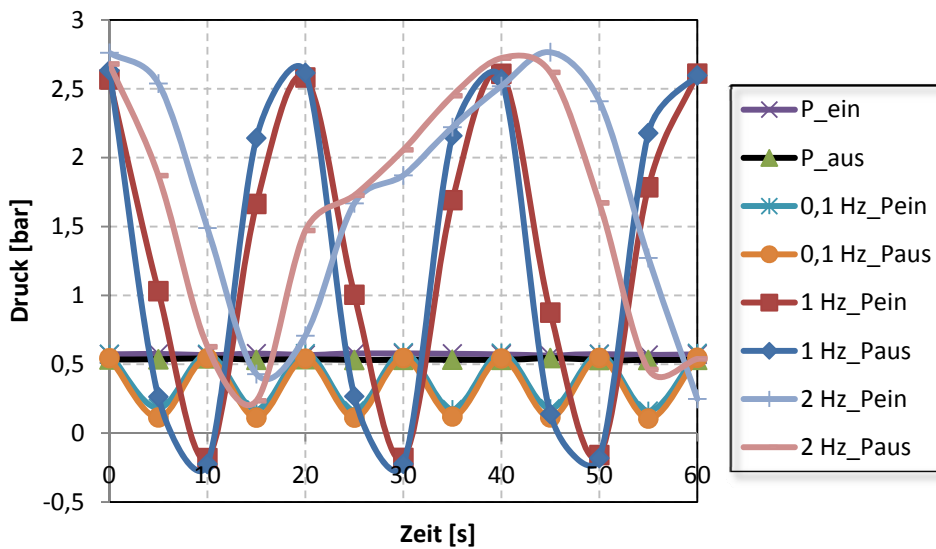
5.1 Pulsierende Strömung zwischen den Platten

Die Pulsationserzeugung und die -reichweite wurden mittels Druckmessung am Eintritt und Austritt des Plattenwärmeübertragers untersucht. Die Druckaufnehmer weisen nach Herstellerangaben [Keller, 2010] eine maximale Abweichung von 0,18 % auf. Die Abb. 4 zeigt typische zeitliche Verläufe der Druckverhältnisse für die untersuchten Pulsationsparameter bei fluiddynamisch vollaufgebildeter Strömung, d. h. im Gleichgewicht. Ein sinusförmiger Verlauf des Druckes kann beobachtet werden sowie die Überlagerung der stationären

Strömung mit der pulsierenden Strömung durch die Verschiebung des Druckprofils.



(a)



(b)

Abb. 4 Druckverlauf am Eintritt (P_{ein}) sowie am Austritt (P_{aus}) des Plattenwärmeübertragers auf der Produktseite (1 Spalt) bei Hubfrequenzen von 0,1, 1 und 2 Hz im Vergleich zum Druckverlauf ohne Pulsation, (a) für die Amplitude von 2,5 mm und (b) für die Amplitude von 5 mm

Durch die Bewegung des Kolbens erfährt das Fluid eine große Beschleunigung zu Beginn des Druckhubs (Ausstoßen) und zu Beginn des Saughubs. Die Konsequenz dieses Geschwindigkeitssprungs ist der Joukowsky-Stoß [Joukowsky, 1900]:

$$\Delta p_J = c \rho \Delta w = c \rho \Delta w_{\text{Kolben}} \quad (13)$$

Die durch die Pumpe erzeugten Schwingungen entwickeln bemerkenswerte Druckpulsationen, wie in der Abb. 4 zu sehen ist.

Die in den Rohren, Umlenkungen, Ventilen, Verteilern am Eintritt des Plattenpaketes und der Plattenkanäle auftretende Überlagerung von Reibungsdruckverlusten der strömenden Flüssigkeit und ihrer Massenträgheit führt, angeregt durch die Pumpe, zu hydraulischen Schwingungen. Diese Schwingungen sind charakteristisch für jedes System.

Für die Platten ist der Druckverlustbeiwert ξ eine Funktion des Prägungswinkels und der Reynoldszahl $\xi = f(\beta, Re)$ und die Kennzahl (ξRe^2) ist direkt proportional zum Druckgradienten Δp (VDI Wärmeatlas, 2006):

$$\xi Re^2 = \frac{2 \Delta p d_h^3 \rho}{L_{Platte} \eta^2} \quad (\text{Lévéque-Analogie für Platten mit Winkel-Wellen-Prägung}) \quad (14)$$

Da die Flüssigkeit mit einem Reynoldszahl $Re = 870$ durch nur einen Spalt strömt, ist der Druckverlust für die stationäre Strömung gering. Der Druckverlust steigt (Verschiebung des Austrittsdruckprofils) aber mit steigender Reynoldszahl (maximale Reynoldszahl für die oszillierende Strömung $Re_{osc, max} = 100 - 4200$) durch den zusätzlichen oszillierenden Anteil der Geschwindigkeit.

Der Joukowsky-Stoß (Gl. 13) kann sich allerdings nur dann in voller Höhe ausbilden, wenn der Stoß schneller ist als die Zeit, welche die Welle braucht, um zur Reflexionsstelle hin- und zurückzulaufen. Ist die Welle schneller, so überlagert sich die reflektierte Welle dem Stoß und schwächt diesen ab [Notzon, 1993]. Außerdem können die erzeugten Schwingungen durch Einbauten in der Anlage reflektiert und durch Interferenz ausgelöscht werden.

Dieser zeitliche Effekt wird für die Frequenzen von 0,1 Hz und 2 Hz deutlich erkennbar. Für die Frequenz von 0,1 Hz wurde kaum ein Unterschied zwischen den Ein- und Austrittsdruckverläufen gemessen. D.h. die Schwingung hat genug Zeit für die Dissipation durch das System und der Einfluss von Reibungsdruckverlustes durch die niedrige Reynoldszahl ($Re_{osc, max} = 100 - 200$) ist noch gering. Für die Frequenz von 2 Hz dagegen ist eine leichte Verzögerung bzw. Dämpfung der Pulsation zu beobachten (Abb. 4b). Vermutlich ist der Effekt des Joukowsky-Stosses für Welligkeiten $W \geq 5$ (Frequenz 2 Hz und Amplitude 5 mm) höher als der Effekt des Druckverlustes durch die Platten- bzw. Einbaugeometrien. Ab der Frequenz von 1 Hz und einer Welligkeit $W = 2,5$ (Abb. 4b) kann eine Verzögerung des Druckprofils beobachtet werden. Deutlich ist die Dämpfung der Schwingung für die Frequenz von 2 Hz und Amplitude 5 mm zu erkennen (vgl. Amplitude 2,5 mm und 5 mm). Das Auftreten einer kompletten Rückströmung (negative Druckwerte) kann bei der Frequenz von 1 Hz und Amplitude von 5 mm ($W = 2,5$) beobachtet werden (Abb. 4b).

Verzerrungen des mittleren Geschwindigkeitsprofils während einer pulsierenden Rohrströmung, die mit der Strömungsablösung zusammenhängen können, werden anhand der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung angedeutet [Linke und Hufschmidt, 1958]. Eine getrennte Betrachtung des Einflusses der Pulsationsparameter und somit der oszillierenden Geschwindigkeit und des Einflusses der Reflexion bzw. Resonanz der Druckwelle auf die Strömung wurden in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

5.2 Einfluss der Pulsation auf den Wärmeübergang

Es wird deutlich, dass durch den Einsatz einer pulsierenden Strömung nicht nur eine Vermeidung oder Verminderung von Verschmutzungen im Wärmeübertrager erreicht wird, sondern auch eine Erhöhung oder eine Verschlechterung des Wärmedurchganges erfolgen

kann [Fallen, 1982; Frank, 1961; Ludlow et al., 1980]. Deswegen wurde die experimentelle Arbeit zuerst auf die Untersuchung des Einflusses der Pulsation auf den Wärmeübergang konzentriert. Dafür wurde Wasser auf der Produktseite verwendet.

Eine Ablösung der Strömung von der Wand, d.h. ein verstärkter Impulsaustausch senkrecht zur Wand und Rückströmungen, sind durch die zeitliche und örtliche Verzögerung der Strömung zu erwarten [Linke und Hufschmidt, 1958]. Solche Vorgänge sowie die positive Beschleunigung des Fluides tragen zur einer Verbesserung des Wärmeübergangs bei. Da die Entwicklung dünner Grenzschichten während einer voll ausgebildeten turbulenten Strömung nicht beeinflusst wird, wird die gleiche Steigerung der Wärmeabgabe durch stationäre Geschwindigkeitserhöhung wesentlich kleiner ausfallen [Linke und Hufschmidt, 1958].

In Abb. 5 ist die Verbesserung des Wärmeübergangs für die pulsierende Strömung über die stationäre Strömung α_{pul}/α_0 in Abhängigkeit der Welligkeit aufgetragen. Für die Welligkeiten von $W = 0,1$ und $W = 0,2$ wurde keine Steigerung des Wärmeübergangs gemessen. Das deutet darauf hin, dass die oben genannten Effekte durch die Beschleunigung der Strömung noch nicht voll entwickelt sind. Eine Verbesserung des Wärmeübergangs kann ab der Welligkeit von 1,3 ($Re_{osc,max} > 1 \times 10^3$) erreicht werden. Eine weitere Vergrößerung von α_{pul}/α_0 mit der Erhöhung der Welligkeit bis $W = 5$ ($Re_{osc,max} = 4 \times 10^3$ bzw. $Re_{max} = 5 \times 10^3$) über den Wert 1,6 hinaus wird nicht beobachtet. Das widerspricht die Definition von $Nu = C Re^n Pr^m$ für stationäre Strömungen in Platten. Das zeigt die Komplexität der überlagert pulsierenden Strömung in Platten.

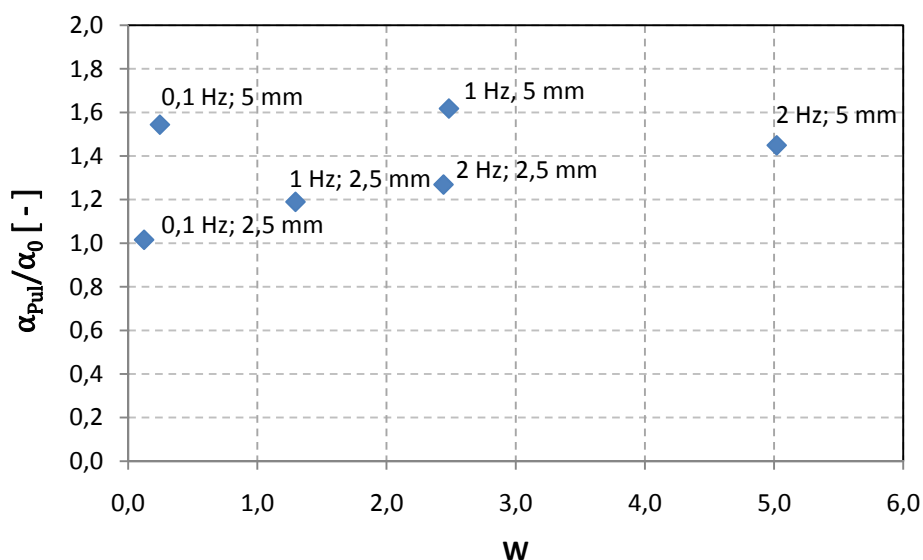


Abb. 5 Verbesserung des Wärmeüberganges durch pulsierende Strömung

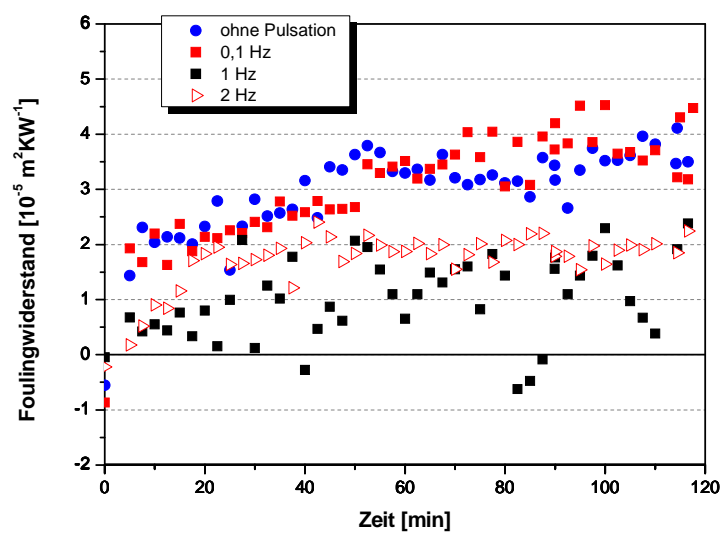
Ein Zusammenhang zwischen Welligkeit und Verbesserung des Wärmeüberganges wurde nicht festgestellt. Ob die Welligkeit gemäß Gl. (3) der geeignete Parameter ist, um die Änderungen an dem Wärmeübergang zu beschreiben, wird in der Literatur noch diskutiert [Olayiwola, 2009]. Davidson und Parker [Davidson und Parker, 1971] fanden, dass die Abweichungen der lokalen Wärmeübertragung einer oszillierenden Strömung gegenüber einer stationären Strömung zwischen zwei parallelen flachen Platten eine Funktion von zwei Parametern ist, nämlich (i) dem Verhältnis von charakteristischer thermischer

Diffusionszeit und Störungszeit und (ii) die durchschnittliche Abweichung in der Größenordnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

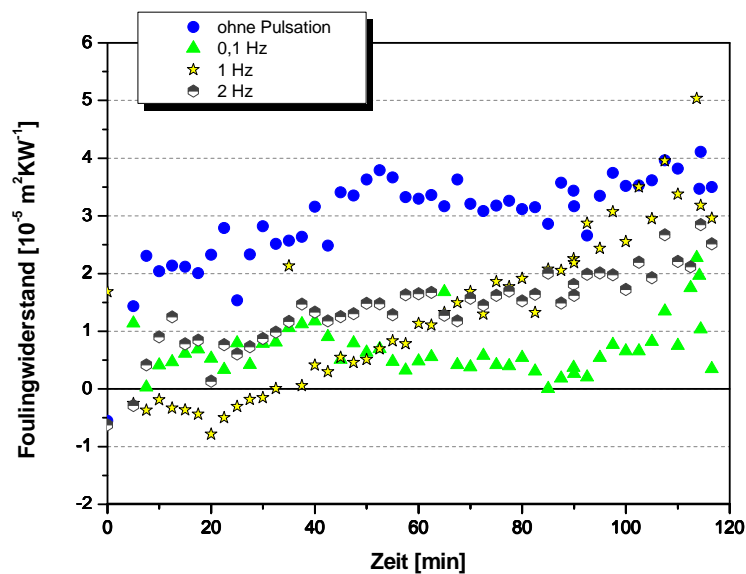
Es ist zu erwarten, dass mit steigender Amplitude der Betrag der Erregerenergie bei den einzelnen Frequenzen höher ist [Eifler et al. 2009], weil durch die Überlagerung der stationären Strömung mittels Oszillation zusätzlich Energie in dem System eingebracht wird. Das wurde für die untersuchten Frequenzen und Amplitude beobachtet (Abb. 5).

5.3 Einfluss der Pulsation auf die Belagbildung

In Abb. 6 sind Foulingkurven für Molkeprotein im untersuchten Plattenwärmeübertrager dargestellt.



(a)



(b)

Abb. 6 Foulingwiderstandsverlauf bei Pulsation für (a) eine maximale Amplitude von 2,5 mm und (b) eine maximale Amplitude von 5 mm

Die Verschlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch die Belagbildung wird durch die Pulsation verzögert bzw. verringert. Eine Veränderung des Temperatur- sowie Konzentrationsprofils beeinflusst sowohl der Stoffübergang als auch die Belagbildung. Mit zunehmender Frequenz (Abb. 6a oder Abb. 6b) beschleunigt sich die Be- und Entlastung der Oberfläche; somit werden die Geschwindigkeitsmaxima aus der Kernströmung zur Wand hin öfter verschoben. Außerdem fördert der Annulareffekt der Pulsation [Sexl, 1930] den Abtragungsvorgang beim Fouling. Eine Ausnahme in der Abb. 6b ist die geringe Steigerung des Foulingwiderstands für die Frequenz von 0,1 Hz. Für diese Versuchsparameter wurde auch eine geringe Proteinkonzentration in dem gebildeten Belag (siehe Tab. 3) festgestellt (verglichen mit der Proteinkonzentration von der Frequenz von 1 und 2 Hz). Mit zunehmender Amplitude (für dieselbe Frequenz, vgl. Abb. 6a und Abb. 6b) nimmt die oszillierende Strömungsgeschwindigkeit zu und die Verschlechterung des Wärmeüberganges beginnt später oder der Anstieg des Foulingwiderstands verringert sich.

Tabelle 3 zeigt die Protein-, Mineral- sowie Calcium- und Phosphatkonzentrationen der auf den Platten abgelagerten Beläge. Tendenziell bildet sich bei einer höheren Welligkeit weniger Ablagerung.

Tab. 3 Zusammensetzung der Beläge für $w_{\text{stat}} = 0,1 \text{ m/s}$

Parameter			Konzentration			
Frequenz [Hz]	Max. Amplitude [mm]	W [-]	Protein [g/m ²]	Mineralien [g/m ²]	Ca [g/m ²]	P [g/m ²]
0,1	2,5	0,1	4,5 ± 1,3	118 ± 43	0,50 ± 0,10	49 ± 13
0,1	5	0,2	1,7 ± 0,2	158 ± 45	0,50 ± 0,13	31 ± 18
1	2,5	1,3	1,67 ± 0,05	204 ± 27	0,43 ± 0,23	40 ± 19
1	5	2,4	1,6 ± 0,6	71 ± 9	0,54 ± 0,13	29 ± 15
2	2,5	2,5	1,1 ± 0,2	86 ± 10	0,59 ± 0,27	37 ± 12
2	5	5	1,7 ± 0,6	4 ± 1	0,24 ± 0,04	20 ± 6
ohne Pulsation			4,0 ± 0,9	280 ± 22	0,41 ± 0,07	29 ± 5

In Abb. 7 sind die Ergebnisse der chemischen Analyse der Beläge dargestellt. Die Verringerung der Konzentration der schichtbildenden Komponenten durch den Einsatz der Pulsation ist zu erkennen. Der Einfluss der Pulsation ist größer auf das Kristallisationsfouling. Eine Welligkeit ab $W \geq 0,2$ bringt keine weitere Abnahme der Proteinkonzentration in der Foulingschicht.

Die Ergebnisse des Einflusses der Pulsation auf die Belagbildung stimmen mit früheren Untersuchungen überein, die allerdings in einem Doppelrohrwärmeübertrager durchgeführt wurden. Polte [Polte, 1987] untersuchte das Foulingverhalten von wässrigen Lösungen von CaCl_2 , NaHCO_3 und NaCl in einem Doppelrohrwärmeübertrager bei überlagerter Strömungspulsation. Er fand raus, dass eine ständige Pulsation zu einem geringeren Foulingwiderstand führt. Eine erste Untersuchung zum Verringerung von Molkeproteinablagerungen durch eine pulsierte Strömung wurde von Bayler et al. [Bayler, 1962]

durchgeführt. Die Erzeugung der Pulsation erfolgte mit dem Einbau von Blenden in einem Doppelrohrwärmeübertrager.

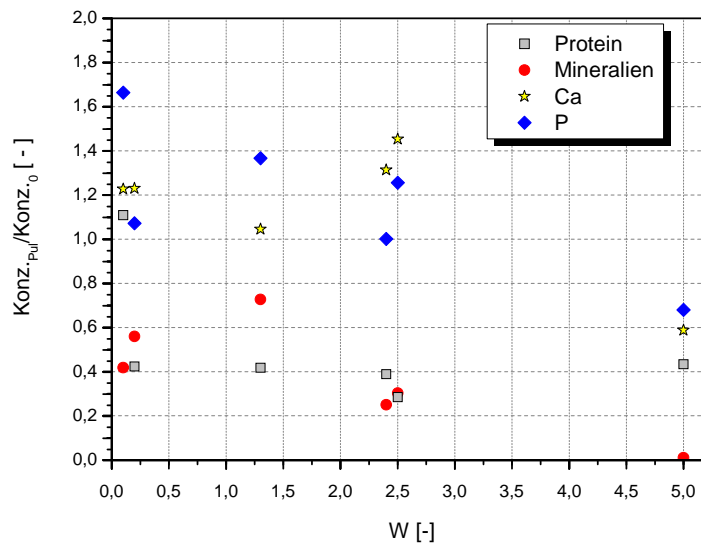


Abb. 7 Einfluss der Welligkeit auf die Konzentration der schichtbildenden Komponenten

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss einer Pulsationsströmung durch Variation der oszillierenden Geschwindigkeit sowie der Pulsationsfrequenz auf das Foulingverhalten von Molkeprotein untersucht und anhand verschiedener Parameter dargestellt. Die Ergebnisse zeigen sowohl eine Zunahme des Wärmeübergangs als auch eine erkennbare Verminderung der Belagbildung mit zunehmender Welligkeit und maximaler Strömungsgeschwindigkeit.

7 Publikationen

Augustin, W., Albert, F., Boxler, C., Geddert, T., Scholl, S. *Verfahrenstechnische Ansätze zur Foulingminderung*, Deutsche Milchwirtschaft, 59, (2): 43-45, 2008.

Augustin, W., Boxler, C., Scholl, S. *Strömungstechnische Ansätze zur Foulingminderung und Verbesserung der Reinigung*, Deutsche Molkerei Zeitung, dmz, (6): 26-29, 2008.

Boxler, C. Augustin, W., Scholl, S. *Einfluss der Oberflächenmodifikation und der Strömungspulsation beim Molkeprotein fouling in einem Plattenwärmeübertrager*, Vortrag auf dem Jahrestreffen des ProcessNet-Fachausschusses "Lebensmittelverfahrenstechnik", 22. - 24. März 2011, Vlaardingen/NL.

8 Symbolverzeichnis

A_k	m^2	Kolbenfläche
A_{Spalt}	m^2	Fläche zwischen zwei Platten

d_h	m	hydraulischer Durchmesser
f	Hz	Frequenz
L_{Platte}	m	Länge der Platte
p	Bar	Druck
s	m	Hublänge
w_K	m/s	Kolbengeschwindigkeit
W	--	Welligkeit
α	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
β	°	Prägungswinkel
ξ	--	Druckverlustkoeffizient
η	%	Wirkungsgrad der Pumpe: $\eta = 98\%$
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
λ_s	--	Kurbelstangenverhältnis: $\lambda_s = r/l$, mit r = Exzenterradius der Kurbelwelle und l = Länge der Pleuelstange
ϕ	--	Flächenvergrößerungsfaktor: $\phi(X) = \frac{1}{6} \left(1 + \sqrt{1 + X^2} + 4\sqrt{1 + X^2/2} \right)$, mit $X = \frac{2\pi\hat{a}}{\Lambda}$. Dabei ist \hat{a} die Amplitude des sinusförmigen Wellenmusters und Λ die Wellenlänge
ω	Hz	Winkelgeschwindigkeit: $\omega = 2\pi f$

9 Literatur

AUGUSTIN, W.; FUCHS, T.; FÖSTE, H.; SCHÖLER, M.; MAJSCHAK, J.-P.; SCHOLL, S. *Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing*, Food and Bioproducts Processing, 88: 384 – 391, 2010.

BANSAL, B.; CHEN, X. D. *A critical review of milk fouling in heat exchangers*. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 5: 27-33, 2006.

BLEL, W.; GENTIL-LELIÈVRE, C. L.; BENEZECH, T.; LEGRAND, J.; LEGENTILHOMME, P. *Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 1: Experimental analysis of wall shear stress in a cylindrical pipe*. Journal of Food Engineering, 90 (4): 422-432, 2009a.

BLEL, W.; LEGENTILHOMME, P.; BENEZECH, T.; LEGRAND, J.; GENTIL-LELIÈVRE, C. L. *Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 2: Effects on cleaning efficiency*. Journal of Food Engineering, 90 (4): 433-440, 2009b.

BODE, K.; HOOPER, R.; PATERSON, B.; WILSON, I.; AUGUSTIN, W.; SCHOLL, S., *Reinigung von Molkeproteinablagerungen mit pulsierender Strömung*, Chemie Ingenieur Technik (78) 5, 2006.

BAYLER, F. J.; EDWARDS, P. A.; SINGH, P. P. *The effect of flow pulsations on heat transfer by forced convection from a flat plate*. Proceedings of the First International Heat Transfer Conference, Boulder: 499 – 509, 1961.

DAVIDSON, D. H.; PARKER, R. O. *Heat transfer to a laminar incompressible fully developed pulsating flow between parallel flat plates*. Journal of Franklin Institute, 291 (1): 57 – 78, 1971.

DETTMANN, P. *Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsprofilen und Wärmeübergang bei turbulenter pulsierender Rohrströmung*. Wärme- und Stoffübertragung 26 (3): 213 - 218, 1991.

EIFLER, W.; SCHLÜCKER, E.; SPICHER, U.; WILL, G. *Küttner Kolbenmaschinen*, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009

FALLEN, M. *Wärmeübergang im Rohr mit überlagerter Strömungspulsation*. Wärme- und Stoffübertragung, 16: 89-99, 1982.

FRANK, G. *Wärmeübergang und Geschwindigkeitsverlauf bei pulsierender Rohrströmung*. Allgemeine Wärmetechnik, 10 (3): 49-59, 1961.

- GILLHAM, C. R. *Enhanced cleaning of surfaces fouled by whey proteins*. Ph.D. dissertation, University of Cambridge, 1997.
- GILLHAM, C. R.; FRYER, P. J.; HASTING, A. P. M.; WILSON, D. I., *Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows*, Journal of Food Engineering, 46: 199-209, 2000.
- JENSEN, B. B. B.; STENBY, M.; NIELSEN, D. F. *Improving the cleaning effect by changing average velocity*. Trends in Food Science and Technology 18: 52-63, 2007.
- JOUKOWSKY, N. E. *Über den hydraulischen Stoß in Wasserleitungsröhren*. Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Pétersbourg, Series 8, 9 (5): 1 - 72, 1900.
- KELLER, 2010 *Prüfprotokoll Druckaufnehmer PA-33X/5bar/80794*, CH, 2010.
- LMHV. Lebensmittelhygiene-Verordnung. August 1997.
- LUDLOW, J. C.; KIRWAN, D. J.; GAINER, J. L. *Heat transfer with pulsating flow*. Chemical Engineering Communications, 7: 211-218, 1980.
- MilchHqV - Verordnung über Hygiene- und Qualitätsanforderungen an Milch und Erzeugnisse auf Milchbasis. April 1995.
- OLAYIWOLA, B. O. Process intensification by low frequency oscillations. TU Dortmund, Diss., 2009.
- POLTE, H. Foulingverhalten von Wärmeübertragungsflächen bei überlagerter Strömungspulsation. Chemische Technik, 39 (9): 379 - 383, 1987.
- SEXL, T. Über den von E. G. Richardson entdeckten Annulareffekt. Zeitschrift Physik 61: 349, 1930.
- VDI Wärmeatlas, 10. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2006.