

Statische Mischer-Wärmeübertrager eröffnen besonders für die Beherrschung laminarer Strömungen viskoser Medien interessante Anwendungsperspektiven. Allerdings lässt sich der Apparat auf Grund seiner nahezu idealen Rohrströmung auch als kontinuierlicher Strömungsreaktor einsetzen. Durch die Kombination von mikroporösem Material mit statischen Mischelementen entsteht ein Kontaktapparat, mit dem Gase auch bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten sehr effizient eingetragen werden können.

Autoren: M.B. Däscher, Zürcher Hochschule Winterthur ZHW, Alain G. Georg, Fluitec Georg AG



# Voll unter Kontrolle

## Reaktor-Wärmeübertrager beherrscht stark exotherme Reaktionen

Beim Erwärmen oder Kühlen hochviskoser Flüssigkeiten findet der Wärmetransport gezwungenermaßen im laminaren Strömungsbereich statt, was zu kleinen Wärmeübergangszahlen führt. Eine Möglichkeit, um die benötigte Wärmeübertragungsfläche möglichst gering zu halten, ist die Steigerung der Temperaturdifferenz, allerdings lassen temperatursensitive Stoffe dies nur begrenzt zu. Außerdem führen laminare Strömungsformen zu einer ungünstigen Verweilzeitverteilung.

Um dieses Problem zu lösen, wurde der Wärmeübertrager CSE-XR (Bild 1b) entwickelt, der die Quervermischung und die Oberflächenenerneuerung durch seine Mischereinbauten strömungstechnisch optimiert (wir berichteten in CT 12/2000). Die hohe Mischleistung sowie die zusätzliche Oberfläche des Rohrbündels sorgen für eine sehr hohe volumenbezogene Wärmeübertragungsleistung. Außerdem wird dadurch bei Austritt aus dem Wärmeübertrager ein ideales Temperaturprofil eingestellt, und dies auch bei Flüssigkeiten mit Viskositäten über 2000 Pas.

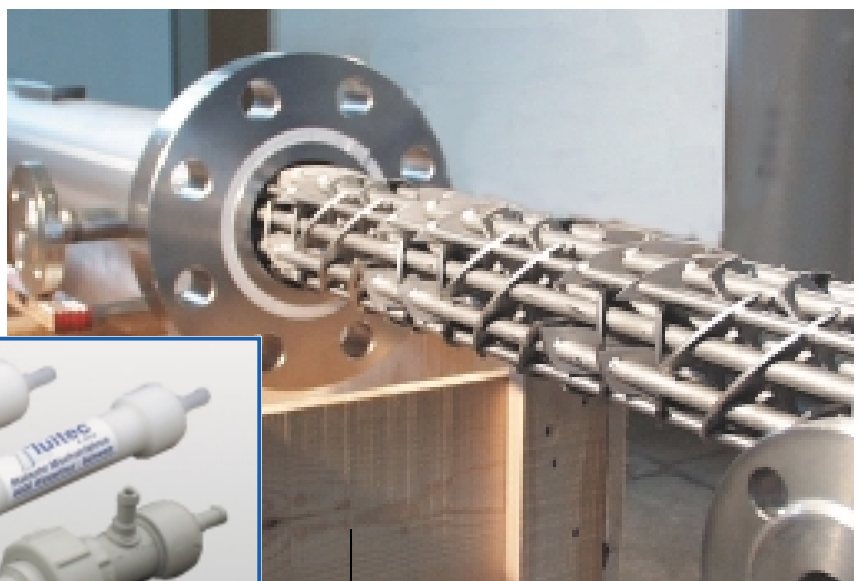
Der Wärmeübertrager zeichnet sich daneben durch folgende Eigenschaften aus:

- Die Mischer-Wärmeübertrager-Fläche ist als ein kompaktes Paket ausbaubar.
- Die gesamte Oberfläche kann kontrolliert gereinigt werden.
- Der Mischer-Wärmeübertrager-Querschnitt ist in der Hauptströmungsrichtung geometrisch überall definiert und reduziert die Fehlverteilung auf ein Minimum, so dass stets eine enge Verweilzeitverteilung vorliegt.

Der Mischer-Wärmeübertrager wird für folgende Anwendungen eingesetzt:

- Heizen und Kühlen im laminaren Strömungsbereich,
- Heizen von viskosen Flüssigkeiten mit Dampf bei größeren Betriebsdrücken,
- Verarbeitung und Herstellung von Klebstoffen und Harzen,
- Kühlen von Schmelzen in der Chemiefaserindustrie,
- Temperieren von Polyol und Isocyanat,
- Temperaturüberwachung von Kunststoffschmelzen und Kunststoffschäumen,
- externe Kühlung von gerührten Tankreaktoren.

1a: FSB-Reaktoren für Laboranwendungen



1b: CSE-XR Wärmeübertrager für hochviskose Klebstoffe

$\frac{dQ}{dt} = -\dot{Q}_L + \frac{d(U_r, T)}{dt} + (-\Delta H_r) \cdot V \cdot \tau + \alpha \cdot A \cdot (T_c - T_r) \quad (1)$																																																																							
$U_{r,1} = \left( \frac{\sum d_i \cdot \sigma}{C_r \cdot \rho_r} \right)^{-1} \quad (2)$																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Symbole</th> <th>Bezeichnung</th> <th>SI-Einheit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>Fläche</td><td>[m<sup>2</sup>]</td></tr> <tr><td>c<sub>p</sub></td><td>mittlere spezifische Wärmekapazität</td><td>[J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]</td></tr> <tr><td>C<sub>2</sub></td><td>Abösetfaktor</td><td>[-]</td></tr> <tr><td>d<sub>m</sub></td><td>mittlere Blasengröße</td><td>[m]</td></tr> <tr><td>d<sub>1</sub></td><td>Durchmesser Gasaustrittsöffnung</td><td>[m]</td></tr> <tr><td>ΔH<sub>r</sub></td><td>molare Reaktionsenthalpie</td><td>[J mol<sup>-1</sup>]</td></tr> <tr><td>J<sub>r</sub></td><td>Wärmestrom</td><td>[J s<sup>-1</sup>], [W]</td></tr> <tr><td>m</td><td>Masse</td><td>[g], [kg]</td></tr> <tr><td>Q</td><td>Wärmenmenge</td><td>[J]</td></tr> <tr><td>v<sub>r</sub></td><td>volumenbezogene Reaktionsgeschwindigkeit</td><td>[mol m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>]</td></tr> <tr><td>V</td><td>Volumen</td><td>[m<sup>3</sup>]</td></tr> <tr><td>t</td><td>Zeit</td><td>[s]</td></tr> <tr><td>T</td><td>Temperatur</td><td>[K], [°C]</td></tr> <tr><td>T<sub>c</sub></td><td>Temperatur der Bilanzgrenze</td><td>[K]</td></tr> <tr><td>u</td><td>Geschwindigkeit</td><td>[m s<sup>-1</sup>]</td></tr> <tr><td>u</td><td>Wärmeübergangszahl</td><td>[W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>]</td></tr> <tr><td>ρ<sub>r</sub></td><td>spez. Dichte der Flüssigkeit</td><td>[kg m<sup>-3</sup>]</td></tr> <tr><td>τ</td><td>Verweilzeit</td><td>[s]</td></tr> <tr><td>σ</td><td>Oberflächenspannung</td><td>[N m<sup>-1</sup>]</td></tr> <tr><td>V<sub>0</sub></td><td>Lückenvolumen</td><td>[-]</td></tr> <tr><td colspan="2"><b>Indizes</b></td><td></td></tr> <tr><td>z</td><td>Koordinatenbezogen</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Symbole	Bezeichnung	SI-Einheit	A	Fläche	[m <sup>2</sup> ]	c <sub>p</sub>	mittlere spezifische Wärmekapazität	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	C <sub>2</sub>	Abösetfaktor	[-]	d <sub>m</sub>	mittlere Blasengröße	[m]	d <sub>1</sub>	Durchmesser Gasaustrittsöffnung	[m]	ΔH <sub>r</sub>	molare Reaktionsenthalpie	[J mol <sup>-1</sup> ]	J <sub>r</sub>	Wärmestrom	[J s <sup>-1</sup> ], [W]	m	Masse	[g], [kg]	Q	Wärmenmenge	[J]	v <sub>r</sub>	volumenbezogene Reaktionsgeschwindigkeit	[mol m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ]	V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]	t	Zeit	[s]	T	Temperatur	[K], [°C]	T <sub>c</sub>	Temperatur der Bilanzgrenze	[K]	u	Geschwindigkeit	[m s <sup>-1</sup> ]	u	Wärmeübergangszahl	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	ρ <sub>r</sub>	spez. Dichte der Flüssigkeit	[kg m <sup>-3</sup> ]	τ	Verweilzeit	[s]	σ	Oberflächenspannung	[N m <sup>-1</sup> ]	V <sub>0</sub>	Lückenvolumen	[-]	<b>Indizes</b>			z	Koordinatenbezogen			
Symbole	Bezeichnung	SI-Einheit																																																																					
A	Fläche	[m <sup>2</sup> ]																																																																					
c <sub>p</sub>	mittlere spezifische Wärmekapazität	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]																																																																					
C <sub>2</sub>	Abösetfaktor	[-]																																																																					
d <sub>m</sub>	mittlere Blasengröße	[m]																																																																					
d <sub>1</sub>	Durchmesser Gasaustrittsöffnung	[m]																																																																					
ΔH <sub>r</sub>	molare Reaktionsenthalpie	[J mol <sup>-1</sup> ]																																																																					
J <sub>r</sub>	Wärmestrom	[J s <sup>-1</sup> ], [W]																																																																					
m	Masse	[g], [kg]																																																																					
Q	Wärmenmenge	[J]																																																																					
v <sub>r</sub>	volumenbezogene Reaktionsgeschwindigkeit	[mol m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ]																																																																					
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]																																																																					
t	Zeit	[s]																																																																					
T	Temperatur	[K], [°C]																																																																					
T <sub>c</sub>	Temperatur der Bilanzgrenze	[K]																																																																					
u	Geschwindigkeit	[m s <sup>-1</sup> ]																																																																					
u	Wärmeübergangszahl	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]																																																																					
ρ <sub>r</sub>	spez. Dichte der Flüssigkeit	[kg m <sup>-3</sup> ]																																																																					
τ	Verweilzeit	[s]																																																																					
σ	Oberflächenspannung	[N m <sup>-1</sup> ]																																																																					
V <sub>0</sub>	Lückenvolumen	[-]																																																																					
<b>Indizes</b>																																																																							
z	Koordinatenbezogen																																																																						

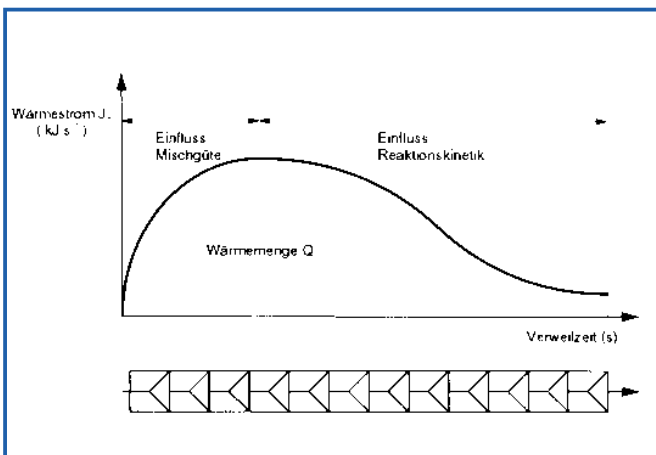
2: Wärmebilanz eines idealen Strömungsreaktors (Gl. 1) und Berechnung der Blasengröße im FSB-Reaktor (Gl. 2)

### Reaktor mit idealer Rohrströmung

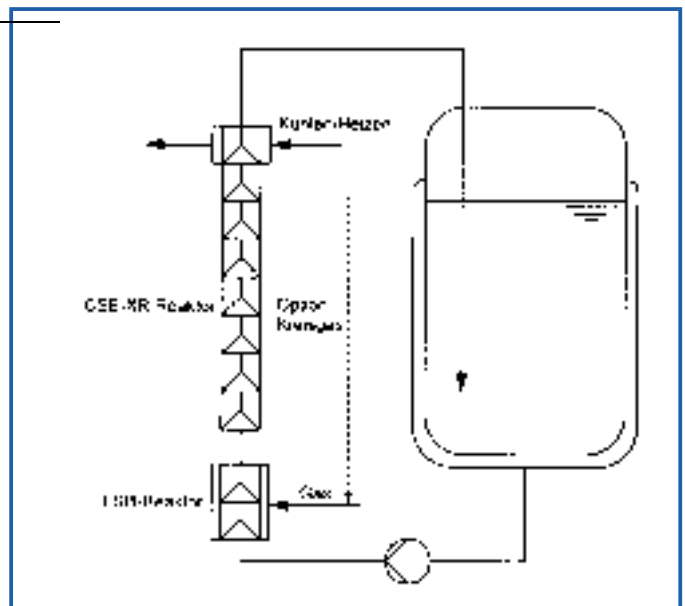
Neben dem Einsatz als Wärmeübertrager wird der CSE-XR auch als Reaktor eingesetzt, der sich unter Berücksichtigung des Lückenvolumens e, auf Grund des sehr guten Ver-

weilzeitverhaltens einer idealen Rohrströmung annähert. Dies gilt speziell auch für hochviskose Flüssigkeiten. Somit ist die Wärmebilanz für den idealen kontinuierlichen Strömungsreaktor eine gute Berechnungsgrundlage für den Reaktor. Die Wärmebilanz bei Reaktionen für den idealen Strömungs-

3: Der zeitliche Temperaturverlauf, welcher im Reaktionskalorimeter erfasst wurde, kann auf In-line Prozesse übertragen werden. Die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Wärmeübertrager muss der örtlich freigesetzten Reaktionswärme angepasst sein.



4: Loop Reaktor für exotherme Gas-Flüssig-Reaktionen



reaktor ist in Gleichung 1 dargestellt (Bild 2). Mit einem Reaktionskalorimeter lassen sich die isotherm durchzuführenden Reaktionen im Labor quantitativ erfassen.

### FSB-Reaktor sorgt für effizienten Gaseintrag

Die gemessenen Daten wie die freigesetzte Reaktionswärme (Wärmebilanz des Heiz- bzw. Kühlkreislafs), den Viskositätsverlauf, die Umsätze sowie die Selektivität sind auch für den kontinuierlichen Prozess wichtige Grundinformationen. Werden diese Werte über die Zeit aufgetragen, so lässt sich daraus die Reaktionsgeschwindigkeit (Kinetik) bestimmen und ggf. einem Geschwindigkeitsgesetz zuordnen. Beim Planen eines kontinuierlichen Prozesses ist der Einfluss der Rührerdrehzahl im Reaktionskalorimeter entscheidend. Falls eine intensivere Durchmischung die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht, so ist unter den gegebenen Bedingungen die Mischgüte und nicht die Kinetik für die Raum-Zeit-Ausbeute maßgebend (Bild 3). Falls die Reaktionsgeschwindigkeit über die Kinetik limitiert wird, kann die Umsatzgeschwindigkeit über die Temperaturführung kontrolliert werden.

Die im Kalorimeter durchgeführte Reaktion lässt sich, unter Berücksichtigung der Mischgüte, auf In-line Systeme mit statischen Mixern übertragen. Für eine exakte Temperaturkontrolle ist der zeitliche Verlauf der Wärmeproduktion von großer Bedeutung, da sich die freigesetzte Reaktionswärme beim In-line System in einem örtlichen Temperaturprofil über die Reaktionsstrecke bemerkbar macht. Die Reaktionszeit entspricht bei identischer Mischung und Temperaturführung der Verweilzeit. Je nach Reaktions-



5: FSB-Reaktor mit Teflonbeschichtung

geschwindigkeit und Anforderung an die Mischgüte sind kurze, längere, unterteilte, parallel geführte oder gar endlose (Loop-) CSE-XR-Reaktoren die richtige Wahl.

Sollen bei einer Reaktion Gase in eine Flüssigkeit eingetragen werden, hat sich ein Mischer-Wärmeübertrager, bestehend aus einer Kombination von mikroporösem Material mit statischen Mischelementen, als Reaktor bewährt. Beim Fluitec Small Bubbles Reactor (FSBR) wird Gas über einen Doppelmantel durch das poröse Rohr in die innen fließende, niederviskose Flüssigkeit dosiert. Der konzentrisch angebrachte statische Mischer verteilt und zerteilt das Gas während seines Transports kontinuierlich (Bild 4). Durch die Verwendung eines porösen Materials müssen die Gasblasen nicht erst mit Hilfe von kinetischer Energie zerschlagen werden. Sie werden bereits in einem frühen Stadium ihrer Entstehung von der porösen Rohrwandung abgelöst und vom Mischer wirksam mit der Flüssigkeit vermischt. Die Blasengröße ergibt sich aus dem Zusammenhang in Gleichung 2 (Bild 2).

Im Vergleich zu bestehenden Systemen mit statischen Mischelementen erzielt der Kontaktapparat somit insbesondere bei tiefen Fließgeschwindigkeiten Stoffeintragungswerte, die um ein Vielfaches höher sind. Bei hohen

Durchsätzen hingegen kommt das Dispergierverhalten der statischen Mischelemente zur Wirkung. Somit wird über die ganze Länge des Kontaktapparates eine konstant hohe



## KOMPAKT

### Gemeinschaftsprojekt

Die im Beitrag vorgestellten Wärmeübertrager und Reaktoren entstammen einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Zürcher Hochschule Winterthur (ZHAW) und der Fluitec Georg AG, das bereits 5 Jahre andauert. Dabei wurde Grundlagenforschung bezüglich Stoffaustausch und Reaktionstechnik betrieben. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in zahlreichen Versuchen überprüft und bestätigt. Ein wesentlicher Bestandteil der Zusammenarbeit ist die wissenschaftliche Begleitung der Konzeptionierung, Auslegung und Inbetriebnahme von Kundenanlagen. Das Projekt wird von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) des Schweizerischen Bundesamtes für Wirtschaft finanziert.

Anreicherung an Gas erreicht – auch bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. FSB-Begasungsreaktoren werden für chemische und physikalische Gas-Absorptionen, sowie zur Desorption von Gasen mit einem Schleppgas eingesetzt. Anwendungsbeispiele sind z.B.:

- exotherme Gas- / Flüssig-Reaktionen,
- pH-Neutralisationen mit  $\text{CO}_2$ ,
- Ozonisierungen, Chlorierungen, Hydrierungen, Oxidationen, etc.,
- Gaseintrag in Biosuspensionen (auch als Air-Lift).

## Kombination meistert stark exotherme Reaktionen

Bei stark exothermen Reaktionen können die In-Line FSB-Kontaktapparate mit dem CSE-XR Wärmeübertrager kombiniert werden. Dieses Wärmeübertragungssystem zeichnet sich durch eine sehr hohe Wärmeabfuhrleistung bei gleichzeitig kleinem Reaktionsvolumen aus. Im Gegensatz zu Rührkesselreaktoren werden Totzonen strikt vermieden und es herrscht eine sehr gezielte und homogene Energiedissipation. So wird die Reaktion jederzeit vollständig kontrolliert und die nötigen Sicherheitsvorkehrungen können drastisch reduziert werden.

Reaktoren mit externem Umwurf- und Begasungssystem bieten sogar zusätzliche Vorteile. Sie ermöglichen die wiederholte Begasung derselben Flüssigkeit, was bei kinetisch limitierten Reaktionen mit niedrigen Reaktionsgeschwindigkeiten oder bei Begasungen mit sehr großen Gasphasenanteilen von entscheidendem Vorteil sein kann. Zudem lassen sich teure, reaktive oder toxische Gase als Kreisgas restlos in die Flüssigkeit eintragen und es können sehr hohe Ausbeuten erzielt werden.

Info

CT 600