Der Wärmeübergang in Reaktionsgefäßen mit Rührwerken*

Von Dr. Ing. H. KRAUSSOLD

C. H. Boehringer Sohn, Ingelheim am Rhein

Überträgt man die Durchführung chemischer Reaktionen aus dem Reaktionsglas in den technischen Maßstab, so erfordert neben der Materialauswahl für das Reaktionsgefäß die Frage der zureichenden Wärmezu- oder -abfuhr besondere Aufmerksamkeit. Heiz- oder Kühlbäder, Mäntel oder in das Gefäß eingebaute Elemente (Rohrschlangen usw.) müssen dimensioniert werden, wozu die Wärmeübergangszahl zwischen dem Inhalt des Gefäßes und der Wärmeaustauschfläche bekannt sein muß. Solche Zahlen sind erst in den letzten fünf Jahren durch Versuchsarbeiten in den USA in größerem Maßstabe gewonnen worden, ältere Untersuchungen im Werk Höchst der ehemaligen I.G. Farbenindustrie AG. sind im folgenden zusammen mit den Ergebnissen der amerikanischen Messungen bearbeitet. Es handelt sich dabei vor allem darum festzustellen, wieweit sich der Wärmeaustausch durch die Einwirkung eines Rührers steigern läßt, wie er häufig schon für Stoffaustauschvorgänge (Lösen, Mischen, Homogenisieren, Emulgieren usw.) in solchen Reaktionsgefäßen vorgesehen wird. Die Flüssigkeitsströmung um die Rohrschlange oder längs der Gefäßwand wird auch bei zähen Flüssigkeiten im allgemeinen turbulent sein, und es wird gezeigt, daß die NUSSELTsche Gleichung für den Wärmeübergang

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

zur Darstellung der Verhältnisse geeignet ist, wenn man in die dimensionslosen Kenngrößen (NUSSELTsche Zahl $Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}$, REYNOLDSsche Zahl $Re = \frac{n b^2}{\nu}$ und PRANDTLsche Kenngröße $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c g \eta}{\lambda}$) zweckmäßige Größen für die kennzeichnenden Abmessungen und die Strömungsgeschwindigkeit einsetzt. Es werden hierzu der Gefäßdurchmesser D, die Rührblattbreite b und die Geschwindigkeit an der Rührblattkante, gegeben durch die sekundliche Drehzahl n, eingeführt.

Die bei allen Messungen sehr ähnliche Versuchseinrichtung geht aus Abb. 1 schematisch hervor: Dem Reaktionsgefäß wird Wärme durch einen Dampfmantel

* Kurzfassung des Aufsatzes in Chem.-Ing.-Techn. *23*, 177 (1951), vorgetragen auf der 21. Tagung des VDI-Fachausschusses für Wärmeforschung am 17. Oktober 1950 in Konstanz.

zugeführt, eine von Kühlwasser durchströmte Schlange nimmt diese Wärme wieder auf, so daß beim Beharrungszustand gemessen werden kann. Variiert wird die mittlere Flüssigkeitstemperatur, die infolge der Rührwirkung recht einheitlich im Kesselinnern ist, und die Rührerdrehzahl. Tab. 1 gibt die Größenverhältnisse der Versuchsanlagen von CHILTON und Mitarbeitern[1], CUMMINGS und WEST[2] und bei der I.G. Höchst wieder; sie reichen von einem kleinen Modell bis zum technischen 1000-Liter-Kessel mit relativ langsam laufenden Blattrührern, bei einem Verhältnis von Gefäßdurchmesser zu Rührblattbreite $D/d \sim 2$. Als Versuchsflüssigkeiten wurden Wasser, Glycerin, einige Kohlenwasserstoffe und Öle verschiedener Zähigkeit verwandt, so daß bei Temperaturen zwischen 60 und 120 °C ein Zähigkeitsbereich zwischen 0,5 und $200 \cdot 10^{-4}$ $\frac{kg/s}{m^2}$ umfaßt wurde.

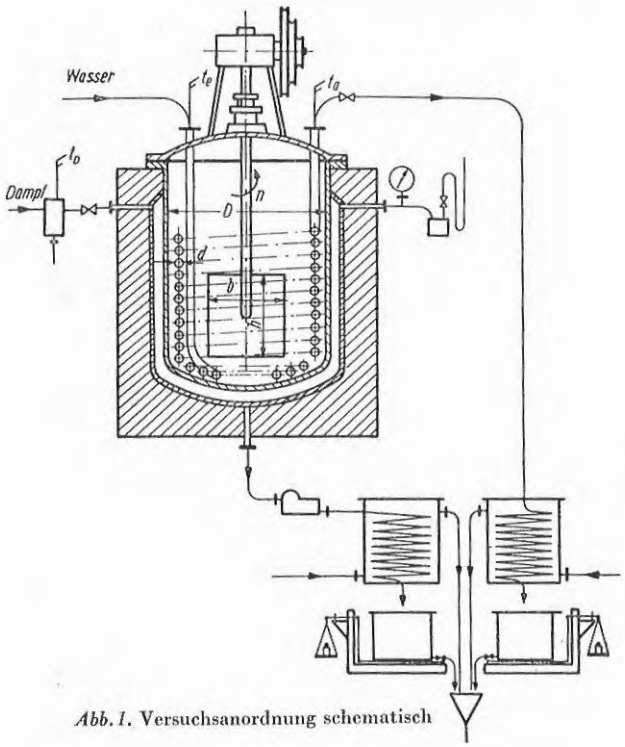


Abb. 1. Versuchsanordnung schematisch

Tab. 1. Abmessungen der Versuchsapparaturen

		CHILTON und Mitarbeiter	CUMMINGS und WEST	Höchst
Reaktionskessel:	D mm	300	750	1000
Dampfmantel:	D mm	350	(800)	1200
Wärmeaustauschfläche:	F m²	0,323	1,52	3,95
Schlange, Rohr:	d mm	½"	1"	25/33
Schlange, Austauschfläche:	f m²	0,225	1,52	6,2
Rührblattbreite:	b mm	180	300	500
D/b		1,67	2,5	2
Rührblatthöhe:	h mm	30	50	710
Drehzahl veränderlich:	n/min	50–300	107–240	33–84
Umfangsgeschwindigkeit:	m/s	0,47–2,8	1,12–2,5	0,86–2,2
Dampfdruck:	atü	bis 7	bis 4,5	0,5–2
Entsprechende Wandtemperatur:	°C	bis 155	bis 150	bis 132

Kühlwassererwärmung und Kondensatgewicht ermöglichen die Aufstellung einer Wärmebilanz, die Temperaturen von Kesselwand und Schlange wurden mit Thermoelementen gemessen. Einige Versuchsreihen, bei denen im Mantel gekühlt und mit der Schlange geheizt wurde, bestätigten den bekannten Einfluß der Richtung des Wärmestromes auf die Wärmeübergangszahl. Zur einheitlichen Darstellung aller Versuchsreihen wurde nach dem Vorschlag von SIEDER und TATE[3] das Verhältnis $\eta w/\eta m$ der Zähigkeit bei Wandtemperatur ηw zu der bei der mittleren Flüssigkeitstemperatur ηm in die NUSSELTsche Gleichung eingeführt. Diese Gleichung nimmt anhand der Versuchsergebnisse folgende Form an:

a) für den Wärmeübergang an der Gefäßwand:

$$Nu = 0{,}36\ Re^{2/3}\ Pr^{1/3} \left(\frac{\eta\, w}{\eta\, m}\right)^{-0{,}14} \qquad (1)$$

b) für den Wärmeübergang an der eingebauten Schlange:

$$Nu = 0{,}87\ Re^{0{,}62}\ Pr^{1/3} \left(\frac{\eta\, w}{\eta\, m}\right)^{-0{,}14} \qquad (2)$$

In den Abbildungen 2 und 3 sind die Versuchspunkte der drei eingangs genannten Arbeiten dargestellt und die Gerade nach den vorstehenden Gleichungen durch sie gezogen. Ob der etwas verschiedene Exponent der Re-Zahl (Vorschlag von CHILTON und Mitarbeitern) wirklich berechtigt ist, läßt sich schwer sagen. Es hat ferner den Anschein, als ob bei etwa $Re = 4 \cdot 10^5$ ein Knick in der Geraden und ein wesentlich steilerer Anstieg der Wärmeübergangszahl möglich ist. Es würde das auf eine Änderung des Strömungszustandes hindeuten, wie man ihn bei raschlaufenden Propellerrührern gut beobachten kann. Leider fehlen gerade in diesem Bereich weitere Messungen. Der Einbau einer Schlange verschlechtert den Wärmeübergang an der Gefäßwand nicht, er scheint ihn im Gegenteil durch zusätzliche Wirbelbildung zu fördern. Durch «Aufheizversuche» nach Ausbau der Schlange konnte das in *Höchst* und *Wilmington* (CHILTON und Mitarbeiter) nachgewiesen werden.

Kleine raschlaufende Rührer scheinen bei gleichen Gefäßabmessungen für den Wärmeaustausch ungünstiger zu sein, wie die gestrichelt in Abb. 2 eingezeichnete Gerade ergibt, die sich auf ein in Höchst untersuchtes, mit 950 U/m umlaufendes Rührblatt mit $D/d = 3{,}85$

[1] J. H. CHILTON, T. B. DREW und R. H. JEBENS, Ind. Eng. Chem. *36*, 510 (1944).

[2] G. H. CUMMINGS und A. S. WEST, Ind. Eng. Chem. *42*, 2303 (1950).

[3] E. N. SIEDER und C. E. TATE, Ind. Eng. Chem. *28*, 1429 (1936).

Tab. 2. Wärmeübergangszahlen α_w (kcal/m² h °C) zwischen Gefäßwand und Flüssigkeit nach Gleichung (1) und α_s zwischen Schlange und Flüssigkeit nach Gleichung (2) für ein Gefäß von 0,3 m ⌀, bei $n = 125$

Flüssigkeit	Stoffwerte bei der mittleren Flüssigkeitstemperatur t_m					Wärmeübergangszahl		Umrechnungsfaktoren für andere Gefäßdurchmesser	
	t_m	γ	c	λ	$\eta \cdot 10^4$	α_M	α_S		
	°C	kg/dm³	kcal/kg °C	kcal/m h °C	$\frac{kg/s}{m^2}$	kcal/m² h °C		D	x
Wasser	65	0,98	1,0	0,568	0,43	3500	5200	m	–
Wasser	10	1,00	1,0	0,497	1,31	2200	3500	0,3	1,0
Sole (25 % NaCl)	38	1,18	0,81	0,422	1,60	1850	2900	0,6	0,96
Methylalkohol	38	0,78	0,62	0,179	0,46	1100	1700	1,2	0,92
Äthyläther	38	0,70	0,52	0,117	0,20	1000	1500	1,8	0,90
Äthylacetat	38	0,88	0,49	0,130	0,39	950	1500	2,4	0,88
Benzol	38	0,86	0,42	0,133	0,50	800	1300	3,0	0,86
Äthylalkohol	38	0,77	0,66	0,155	0,86	800	1300		
Schwefelsäure (90 %)	38	1,80	0,40	0,241	12,0	700	1100		
Tetrachlorkohlenstoff	38	1,56	0,20	0,097	0,79	700	1000		
Isopropylalkohol	38	0,77	0,62	0,131	1,42	600	1000		
n-Butylalkohol	38	0,80	0,61	0,143	1,90	600	950		
Leichtbenzin	38	0,80	0,49	0,122	1,50	550	900		
Gasöl	38	0,85	0,47	0,115	2,11	450	800		
Glycerin (92 %)	38	1,22	0,62	0,255	60,0	400	650		
L-M-Öl	38	0,91	0,45	0,107	26,0	200	350		
Leichtes Schmieröl	38	0,88	0,46	0,110	45,0	200	300		
Schweres Schmieröl	38	0,90	0,45	0,109	95,0	150	250		
A-12-Öl	38	0,88	0,46	0,115	425,0	100	150		

bezieht. Endgültiges läßt sich darüber ohne weiteres Versuchsmaterial noch nicht sagen. Als die günstigste Stellung des Rührers im Gefäß ergab sich aus den Messungen von RUSHTON[4] und Mitarbeitern die, bei der der Rührer in der Mitte zwischen Gefäßboden und Flüssigkeitsoberkante angeordnet ist. Die Form des Gefäßbodens dürfte dabei aber nicht ohne Einfluß sein.

Als Hilfsmittel für überschlägliche Rechnungen kann Tab. 2 benutzt werden, die einer Arbeit von MACK und UHL[6] entnommen und auf metrisches Maßsystem umgerechnet ist. Sie gibt für ein Gefäß von 300 mm Durchmesser und 125 U/m für den Rührer die Wärmeübergangszahlen für Schlange und Gefäßwand für eine Reihe von Flüssigkeiten, berechnet nach Gleichung (1) bzw. (2). Für Gefäße mit größerem Durchmesser D kann mit

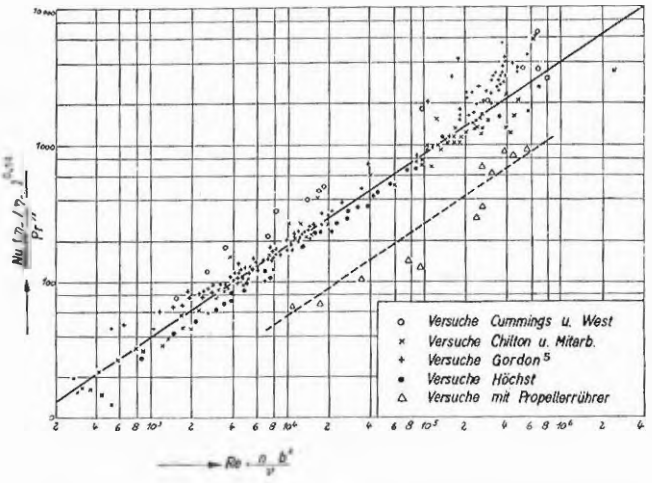


Abb. 2. Wiedergabe der Abb. 10 der Arbeit von CUMMINGS und WEST über den Wärmeübergang an der Gefäßwand; eingetragen sind zusätzlich die Höchster Messungen

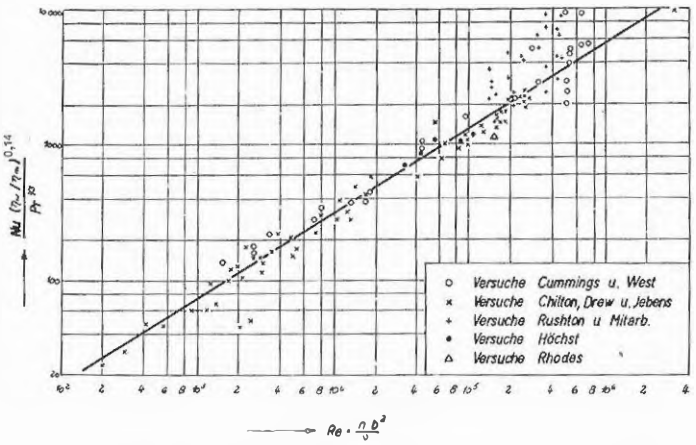


Abb. 3. Wiedergabe der Abb. 10 der Arbeit von CUMMINGS und WEST über den Wärmeübergang an der eingebauten Schlange; eingetragen sind zusätzlich die Höchster Messungen und ein Punkt aus einer Arbeit von TH. RHODES[7]

[4] J. H. RUSHTON, R. L. LICHTMANN und L. H. MAHONEY, Ind. Eng. Chem. *40*, 1082 (1948).

[5] M. GORDON, University of Minnesota Thesis, June 1941 (dem Verfasser dieses Aufsatzes nicht zugänglich).

[6] D. E. MACK und V. W. UHL, Chem. Eng. *54*, 115 und 119 (1947).

[7] T. H. RHODES, Ind. Eng. Chem. *26*, 944 (1934).

den in der letzten Spalte angegebenen Faktoren x multipliziert werden. Die weitere Annahme von MACK und UHL, daß nämlich die Tabelle für beliebige Rührerformen und Drehzahlen verwendbar sei, wenn man gleicher in den Rührer gesteckter Energie gleiche Wirkung zuschreibe, dürfte für den Wärmeaustausch nicht zutreffen (wohl aber für die Güte der Durchmischung und damit den Stoffaustausch oder die Reaktionszeit), da die Art der Anströmung der Wärmeaustauschflächen (Formgebung von Gefäß, Rührer und Einbauten) offensichtlich eine wichtige Rolle spielt und weiterer Klärung bedarf.