

## REAKTIONSKALORIMETER UND REAKTIONSRÖHRBEHÄLTER MIT VERBESSERTEM WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN

### Reaction Calorimeter and Agitated Reaction Vessel with Improved Overall Heat Transfer Coefficient

F. Mirtsch, R. Powierski, W. Roetzel

*Institut für Thermodynamik der Hochschule der Bundeswehr, Hamburg (B.R.D.)*

#### Abstract

In present types of reaction calorimeters and agitated reaction vessels the overall heat transfer coefficient between reaction mixture and cooling fluid is low, caused by the low heat transfer coefficient on the cooling fluid side. Consequently the thermal response time is high and a quasi-isothermal reaction is difficult to obtain. A new construction of a cylindrical double wall reaction vessel is presented which yields a higher overall heat transfer coefficient than conventional constructions. The cooling fluid flows through a helically shaped flow path between the walls. The outer wall is especially bulged to improve strength and heat transfer. Two reaction vessels are tested yielding good results.

#### Zusammenfassung

Bei gegenwärtigen Reaktionskalorimetern und Reaktionsrührbehältern ist der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Reaktionsgemisch und Kühlmittel klein, was auf den schlechten Wärmeübergang auf der Kühlmittelseite zurückzuführen ist. Die Folge ist eine große thermische Trägheit und, daß eine quasi-isotherme Reaktionsführung erschwert wird. Es wird eine neue Konstruktion eines zylindrischen, doppelwandigen Reaktionsbehälters vorgestellt, die einen besseren Wärmedurchgang erreicht als herkömmliche Konstruktionen. Das Kühlmittel strömt wendelförmig zwischen den Wänden. Die äußere Wand ist speziell gebeult zur Erhöhung der Stabilität und des Wärmeübergangs. Es werden zwei Reaktionsbehälter mit gutem Ergebnis getestet.

## EINLEITUNG

Reaktionskalorimeter und Reaktionsrührbehälter, im folgenden beide mit Reaktionsbehälter bezeichnet, sollen eine geringe thermische Trägheit besitzen und eine angenähert isotherme Reaktionsführung ermöglichen. Wenn auf eine aufwendige elektrische Regelung verzichtet werden soll, muß der Reaktionsbehälter einen möglichst großen Wärmedurchgangskoeffizienten besitzen, damit die Reaktionswärme bei einer kleinen Temperaturdifferenz übertragen wird zwischen dem Reaktionsgemisch und dem Heiz- oder Kühlmedium, im folgenden beide mit Kühlmedium bezeichnet. Zum Erwärmen der Reaktionsprodukte auf Reaktionstemperatur wird in der Praxis zur Einsparung besonderer Wärmeaustauscher häufig der Reaktionsbehälter selbst verwendet. Um die Aufheizzeiten klein zu halten, ist ebenfalls ein möglichst großer Wärmedurchgangskoeffizient erstrebenswert.

Im allgemeinen ist der innere Wärmeübergang (Reaktionsproduktseite) bei intensivem Rühren der Reaktionsprodukte mit üblichen Rührern (Propeller- oder Scheiben-Rührer) sehr gut. Vielfach ist auch die Wärmeleitung durch die Wand des Behälter so gut, daß der Wärmedurchgangskoeffizient hauptsächlich durch den vergleichsweise schlechteren Wärmeübergang auf der Kühlmittelseite bestimmt wird.

Bei den gegenwärtigen Konstruktionen von Reaktionsbehältern werden für die Stromführung des Kühlmediums meistens der glatte Ringspalt im Mantelraum oder das auf den Behälter aufgeschweißte Halbrohr verwendet [1]. Der Ringspalt im Mantelraum läßt in der Regel nur eine niedrige mittlere Strömungsgeschwindigkeit bei einem vergleichsweise geringen Wärmeübergangskoeffizienten zu. Das aufgeschweißte Halbrohr ermöglicht zwar eine größere mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit einem besseren Wärmeübergangskoeffizienten, ist jedoch bezüglich der Herstellung relativ aufwendig. In dieser Arbeit werden nach einem neuartigen Herstellungsverfahren gebaute Reaktionsbehälter beschrieben, die eine für den Wärmeübergang günstigere Stromführung des Kühlmediums ermöglichen und gleichzeitig den Materialaufwand herabsetzen.

## HERSTELLUNG UND AUFBAU

Die Herstellung erfolgt nach dem in [2] beschriebenen Beulverfahren dünnwandiger, zylindrischer Behälter. Das Beulverhalten zylind-

drischer Behälter unter Außendruck ist vielfach [3, 4] untersucht und beschrieben worden. Bisher wird allerdings in der Technik ein Beulvorgang als unerwünscht angesehen, da hierdurch ein Behälter in der Regel unbrauchbar wird. Ein gezielter Beulvorgang (viele kleine und versetzte Beulen) kann jedoch eine erhöhte Formstabilität des zylindrischen Behälters bewirken und dabei noch die Wärmeübertragungseigenschaften verbessern.

Bei der Herstellung des Reaktionsbehälters wird zunächst entsprechend Bild 1 auf den inneren zylindrischen Behälter eine Rohrschlange wendelförmig aufgelötet oder aufgeschweißt.

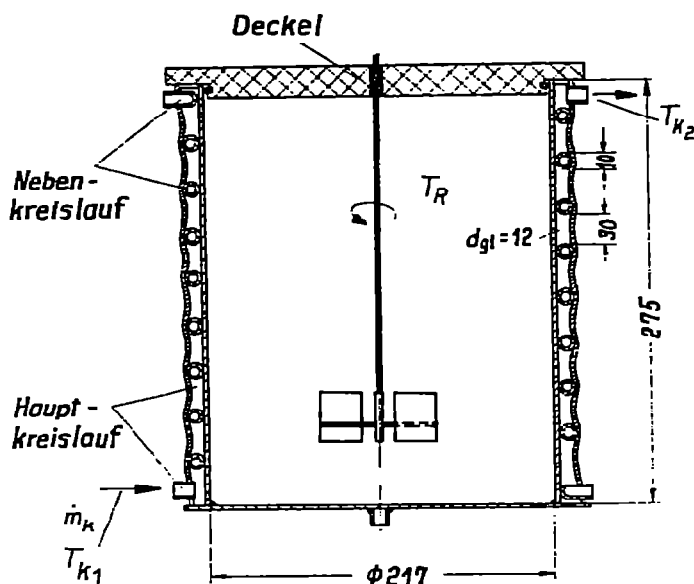


Bild 1: Rührbehälter mit wendelförmigem Ringspalt. Längenmaße in mm

Dann wird der äußere zylindrische Behälter über die Rohrwendel geschoben und in einer geeigneten Abdrückvorrichtung [2] mit Außendruck beaufschlagt. Hierbei bilden sich die in Bild 2 abgebildeten Seulen. Die Anzahl  $m$  der Beulen pro Umfang läßt sich nach der empirischen Näherungsgleichung berechnen

$$m \approx 2,65 \left(\frac{D}{h}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{h}{S}\right)^{1/6} \quad (1)$$

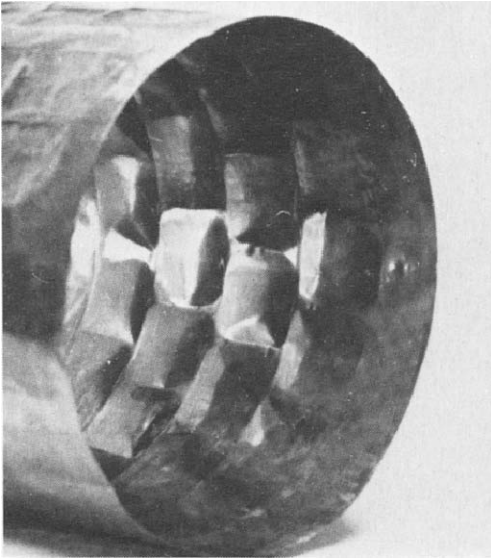


Bild 2:  
Dünnwandiger  
Beulzylinder

in der  $D$  den Durchmesser des zylindrischen Behälters,  $h$  die Steigung der Rohrwendel und  $S$  die Wanddicke des zylindrischen Behälters bedeuten.

Durch den Beulvorgang des äußeren zylindrischen Behälters ergeben sich folgende für einen Reaktionsbehälter günstige Eigenschaften: Der äußere zylindrische Behälter wird formschlüssig an die Rohrwendel gepreßt, und es entsteht ein wendelförmiger Strömungskanal für das Kühlmedium. Die Strömungsgeschwindigkeit wird im Vergleich zum üblichen glatten Ringspalt erhöht, und die Beulen bewirken eine zusätzliche Verwirbelung des Kühlmediums. Beides erhöht den Wärmeübergang auf der Kühlmittelseite. Gleichzeitig bilden der innere Behälter, die Rohrwendel und der äußere Behälter eine formstabile Einheit, so daß dünnwandige Behälter verwendet werden können. Für Reaktionsrührbehälter ergibt sich schließlich noch die Möglichkeit, das Kühlmedium in zwei getrennten Kreisläufen zu führen und dadurch einen kostengünstigeren Kühlmittelverbrauch zu erreichen. Im Hauptkreislauf (Bild 1) kann billiges Kühlmedium z.B. technisches Abfallwasser verwendet werden, welches nur angenähert die erforderliche Temperatur besitzt. Nur im Nebenkreislauf (Rohrwendel) wird "teures" Kühlmedium (z.B. aus einem Thermostat) zur Feinregulierung benötigt.

#### ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Es wurden Wärmeübergangsmessungen an dem in Bild 1 schematisch dargestellten Behälter durchgeführt [5]. Als Reaktionsprodukt

diente elektrisch beheiztes Wasser (im stationären Betrieb konstante Heizleistung  $\dot{N}_{el}$ ), welches mittels eines Scheibenrührers [6] gut durchmischt wurde. Als Kühlmittel im Behältermantel diente thermostatisiertes Kühlwasser aus einem Thermostaten. Der Behälter war außen gut isoliert, so daß Wärmeverluste nach außen zu vernachlässigen waren.

Zur experimentellen Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ , des inneren (Reaktionsproduktseite) und des äußeren (Kühlmittel) Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_R$  bzw.  $\alpha_K$  wurden folgende vereinfachende jedoch realistische Annahmen getroffen. Die Temperatur  $T_R$  der Reaktionsprodukte (Wasser) im Behälter und der innere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_R$  sind infolge der guten Durchmischung unabhängig vom Ort. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_K$  ist infolge der Beulen und der geringen Temperaturänderung ebenfalls unabhängig vom Ort. Es ergibt sich dann der schematische Temperaturverlauf in Bild 3.

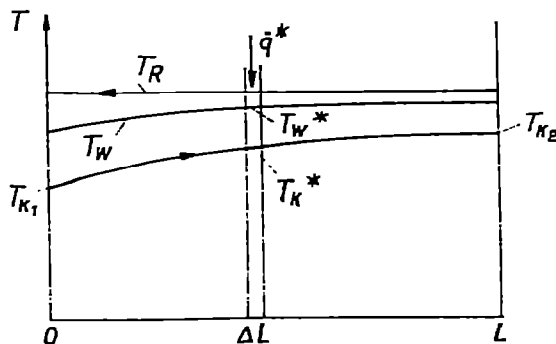


Bild 3: Temperaturen  $T_R$ ,  $T_W$ ,  $T_K$  in Abhängigkeit von der Länge des wendelförmigen Ringspaltes

Im stationären Betrieb gilt die Energiebilanz:

$$\dot{N}_{el} = k \cdot F \cdot \Delta T_m = \dot{m}_K \cdot c_{pK} \cdot (T_{K2} - T_{K1}), \quad (2)$$

wobei  $F$  die Austauschfläche,  $\dot{m}_K$  den Kühlwassermengenstrom,  $c_{pK}$  die spezifische Wärmekapazität des Kühlwassers,  $T_{K1}$  und  $T_{K2}$  die Kühlmessereintritts- bzw. -austrittstemperatur,  $T_W$  die Wandtemperatur und  $\Delta T_m$  die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz bedeu-

ten entsprechend der Gleichung:

$$\Delta T_m = \frac{T_{K2} - T_{K1}}{\ln \left( \frac{T_R - T_{K1}}{T_R - T_{K2}} \right)} \quad (3)$$

Aus den Gln. (2) und (3) läßt sich der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  bestimmen.

Zur Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_R$  und  $\alpha_K$  wurden an einer beliebigen Meßstelle der zylindrischen Behälterwand die örtlichen Temperaturen  $T_K^*$  und  $T_W^*$  gemessen. Die Messung der örtlichen Wandtemperatur  $T_W^*$  erfolgte durch ein dünnes Mantelthermoelement, welches in die innere zylindrische Behälterwand in der Weise eingelötet wurde, daß an der Meßstelle die Strömungsgrenzschicht nicht gestört wurde. Der Temperaturabfall in der dünnwandigen Behälterinnenwand war vernachlässigbar klein. Aus dem örtlichen Wärmestrom  $\dot{q}^*$  an der Meßstelle\*

$$\dot{q}^* = k (T_R - T_K^*) \quad (4)$$

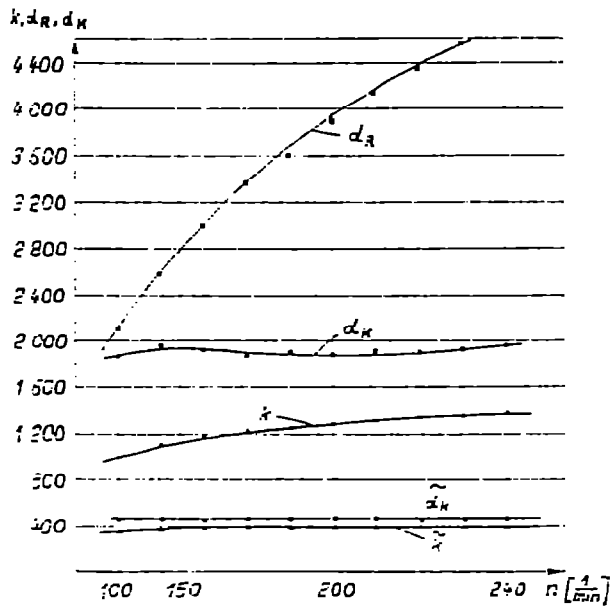
errechnen sich dann die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_R$  und  $\alpha_K$  nach folgenden Gleichungen:

$$\alpha_R = \frac{\dot{q}^*}{T_R - T_W^*} \quad (5)$$

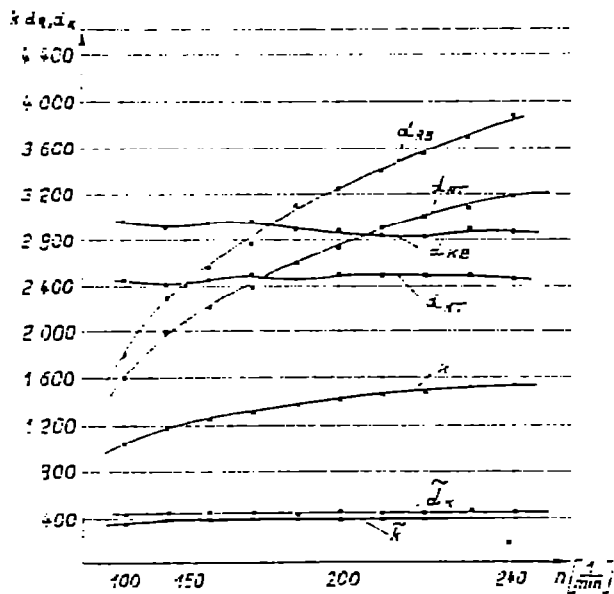
$$\alpha_K = \frac{\dot{q}^*}{T_W^* - T_K^*} \quad (6)$$

Die gewonnenen Werte für  $k$ ,  $\alpha_R$  und  $\alpha_K$  sind in Bild 4a in Abhängigkeit von der Rührerdrehzahl  $n$  (in Umdrehungen pro Minute) bei konstanter Reynoldszahl  $Re_K$  des Kühlwassers, dagegen in Bild 5a in Abhängigkeit von  $Re_K$  bei konstanter Rührerdrehzahl  $n$  dargestellt.  $Re_K$  wurde mit der mittleren Kühlwassergeschwindigkeit im wendelförmigen Ringspalt und dem gleichwertigen Durchmesser  $d_{g1}$  (Bild 1) des Ringspalts gebildet.

Zum Vergleich sind in den Bildern 4a/5a zusätzlich näherungsweise berechnete Werte von  $\tilde{k}$  und  $\tilde{\alpha}_K$  wiedergegeben. Diese gelten für einen Reaktionsbehälter mit glattem Ringspalt (keine Rohrwende und Beulen) bei sonst gleichen Abmessungen und Versuchsbedingungen.

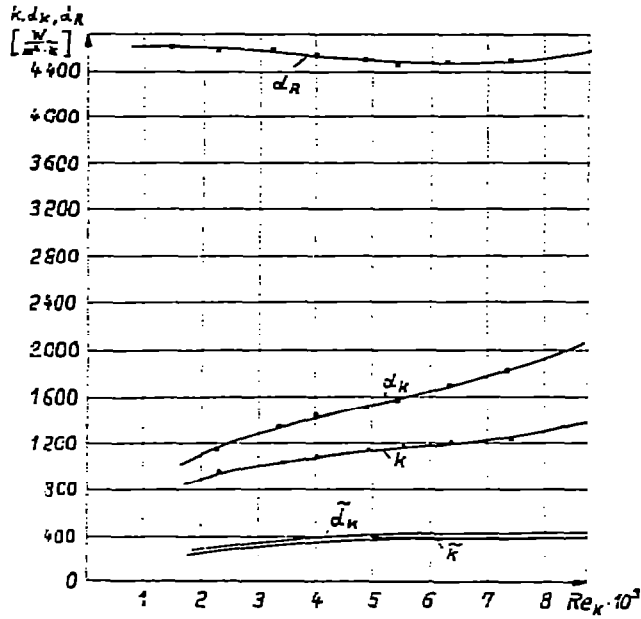


a)  
 innerer Behälter glatt;  
 äußerer Behälter gebault

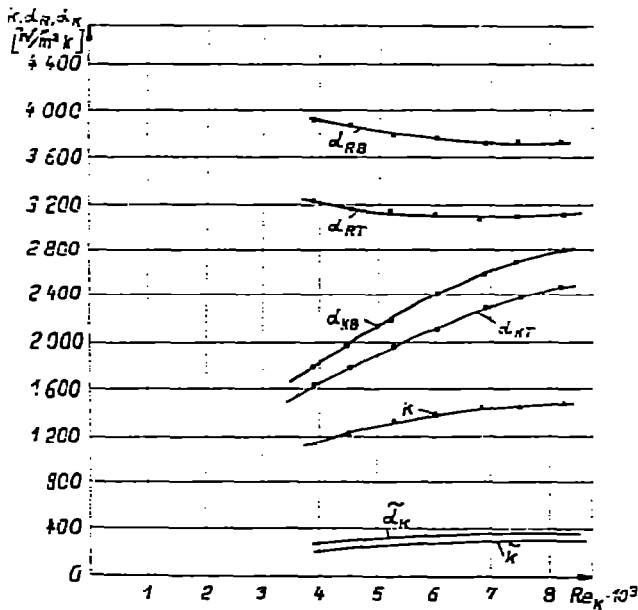


b)  
 innere und äußerer  
 Behälter gebault

Bild 4 : Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ ,  $\tilde{k}$  und Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_R$ ,  $\alpha_K$ ,  $\tilde{\alpha}_K$  in Abhängigkeit von der Pührerdrehzahl  $n$ .  
 ( $Re_K = 9020$ )



a)  
innerer Behälter glatt;  
äußerer Behälter gebault



b)  
innerer und äußerer  
Behälter gebault

Bild 5 : Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ ,  $\tilde{k}$  und Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_R$ ,  $\alpha_K$ ,  $\tilde{\alpha}_K$  in Abhängigkeit von der Re-Zahl (Kühlwasser).  
( $n = 240$  1/min)



Die Bilder 4a und 5a zeigen deutlich, daß der Wärmeübergangskoeffizient  $\tilde{\alpha}_K$  auf der Kühlmittelseite erheblich schlechter ist als der innere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_R$  (bis zu Faktor 10). Es lohnt sich folglich, den Wärmeübergang auf der Kühlmittelseite zu verbessern. Durch die neue Behälterkonstruktion konnte bei vergleichbarem Kühlwasserstrom  $\dot{m}_K$  der äußere Wärmeübergangskoeffizient auf  $\alpha_K = 1900 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  und damit der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient auf  $k = 1400 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  gesteigert werden.

Der gesamte Druckverlust auf der Kühlmittelseite setzt sich aus dem Druckverlust im wendelförmigen gebeulten Ringspalt (Bild 1) und dem Druckverlust in den Zu- und Ableitungen des Kühlwassers zusammen. Der Druckverlust im wendelförmigen gebeulten Ringspalt ist höchstens um den Faktor 2 größer als in einen vergleichbaren wendelförmigen glatten Ringspalt und bleibt daher relativ gering. Bei den beschriebenen Versuchen reichte eine übliche Umwälzpumpe eines Thermostaten für den Transport des Kühlwassers aus.

Nach den zuvor beschriebenen Versuchen wurden Wärmeübergangsmessungen an einem anderen Behälter durchgeführt, bei dem auch die innere zylindrische Wand gebeult ist. Hierdurch sollte geprüft werden, welche zusätzliche Steigerung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch die Beulung der Innenfläche zu erzielen ist. Die Meßergebnisse sind in Bild 4b und 5b dargestellt. Infolge der Beulstruktur sind die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_B$  jetzt nicht mehr unabhängig vom Ort. Bei den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_B$  und  $\alpha_K$  bedeuten die Indices B "Berg" und T "Tal" einer Beule. Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_B$  bzw.  $\alpha_K$  liegt jeweils zwischen diesen Werten.

Die Bilder 4b und 5b zeigen, daß auf der Kühlmittelseite der Wärmeübergangskoeffizient auf  $\alpha_K \approx 2400 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  gesteigert werden konnte. Allerdings verschlechterte sich der innere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_R$  geringfügig, so daß der Wärmedurchgangskoeffizient nur auf  $k \approx 1500 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  erhöht werden konnte. Eine zusätzliche Beulverformung des inneren zylindrischen Behälters bringt also nur eine geringe Verbesserung.

Aus diesen Ergebnissen folgt, daß in Reaktionsbehältern hauptsächlich der äußere Wärmeübergang durch günstigere Stromführung und Verwirbelung des Kühlmediums verbessert werden sollte.

Wandrauhigkeiten auf der Innenwand können sogar eine Verschlechterung des Wärmeübergangs bewirken. Das läßt sich vermutlich dadurch erklären, daß innen die Turbulenzerzeugung trotz der Wandrauhigkeit hauptsächlich durch den Rührer erfolgt, während die Wandrauhigkeit Totwassergebiete erzeugt, die den Wärmeübergang verschlechtern.

#### LITERATUR

- [1] VDI-Wärmeatlas, Abschnitt Cb 5  
VDI-Verlag, Düsseldorf 1974
- [2] Nirtsch, F.: Verfahren zur Verformung dünnwandiger  
Rohr- und dünnwandiger Behälterwände  
und Verwendung derselben.  
Offenlegungsschrift 2557215, 1977
- [3] Meincke, H.: Berechnung und Konstruktion zylindrischer  
Behälter unter Außendruck.  
Konstruktion 11, Heft 4, 1959
- [4] Eßlinger, M.: Eine Erklärung des Beulmechanismus von  
dünnwandigen Kreiszyklinderschalen.  
Der Stahlbau 12, 1967
- [5] Powierski, R.: Konstruktion und Erprobung eines zylindri-  
schen Thermostatisierungsbehälters.  
Diplomarbeit im Institut für Thermodynamik  
(Prof. Dr.-Ing. W. Roetzel), Hochschule  
der Bundeswehr Hamburg, 1979
- [6] VDI-Wärmeatlas, Ergänzungsblätter Ma 1 bis Ma 6,  
VDI-Verlag, Düsseldorf 1977