



# Inbetriebnahme einer Präzisions-Apparatur für Wärmeübergangsmessungen beim Sieden reiner Stoffe und Nachrüstung für Stoffgemische / Teil I

Josef Schmadl, Peter Ignaszewski

Das Sieden ist eine bevorzugte Form der Wärmeübertragung in der konventionellen und nuklearen Kraftwerktechnik, aber auch in vielen Anwendungen prozeßtechnischer Industriebranchen, z. B. chemische Siedereaktoren, lebensmitteltechnische Eindampfprozesse oder Erdöldestillationen, weil sich dabei vergleichsweise zur Wärmeübertragung ohne Änderung des Aggregatzustandes viel höhere Wärmestromdichten erzielen lassen. Schlüsselgröße für die verfahrenstechnische Auslegung von Verdampfern im Apparatebau und auch für die Beurteilung und Optimierung der Verdampferleistung im Betrieb ist der Wärmeübergangskoeffizient (WÜK). Mit zunehmender Energieverknappung gewinnt seine genaue Kenntnis immer größere Bedeutung, wie die Entwicklung der letzten 20 Jahre zeigt. Wegen der vielen Einflußgrößen des komplexen Siedevorgangs, wie z. B. Wandüberhitzung, Druck, Stoffdaten, Wandrauhigkeit und -geometrie ist die genaue Ermittlung des WÜK nicht einfach. Aus diesem Grund sind selbst die Berechnungsgleichungen des WÜK für reine Stoffe noch mit großen Unsicherheiten behaftet und liefern sichere Ergebnisse nur dann, wenn mindestens ein experimenteller Meßwert bekannt ist. Noch komplexer gestaltet sich die Sachlage im Falle siedender Gemische, die – anders als für die meist auf siedende Reinstoffe beschränkten energetischen Anwendungen – für prozeßtechnische Anwendungen, z. B. in Chemie, Lebensmittelverfahrenstechnik und Erdöldestillation, die Regel sind. Dabei ist man noch mehr auf experimentelle Daten angewiesen, weil es allgemein anwendbare, d. h. alle Einflußparameter umfassende Berechnungsgleichungen für Stoffgemische noch nicht gibt.

Wegen der vielen Einflußparameter, zu denen nicht zuletzt die Geometrie der Meßapparatur zählt, lassen sich die Meßergebnisse verschiedener Autoren nicht ohne weiteres vergleichen [1]. Deshalb gab es schon im Zuge der Messungen an reinen Stoffen Bestrebungen, eine Normapparatur zu entwickeln, um die oft apparaturbedingten Unterschiede der Meßergebnisse verschiedener Autoren auszuschließen. Aufgrund von Erfahrungen aus zwei Jahrzehnten Experimentiertechnik in der Wärmeübertragung des Siedens wurde eine solche Standard-Siedeapparatur in den Jahren 1970 – 81 mit Fördermitteln der DFG am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik der Universität Karlsruhe für hochgenaue Wärmeübergangsmessungen an reinen Stoffen entwickelt [2]. Sie wird im Rahmen dieser Arbeit für Stoffgemische umgebaut.

## 1 Beschreibung der Apparatur

In Abb. 1 ist die Standard-Siedeapparatur schematisch dargestellt. Sie besteht im wesentlichen aus einem Versuchsstoffkreislauf, der sich in einer Klimazelle befindet. Kernstück der Anlage ist das elektrisch beheizte, horizontale Versuchsrohr, an dem der Wärmeübergangskoeffizient gemessen wird. Ein Kühlkreislauf dient zur Wärmeabfuhr aus dem Versuchsstoffkreislauf. Zur Apparatur gehören außerdem ein Elektronikschrank mit 60"-Einschüben für die Starkstromversorgung und für die Verarbeitung und Anzeige der Meßsignale sowie eine Eiszelle als Vergleichsstelle für die Thermoelemente.

### 1.1 Versuchsstoffkreislauf

Der Versuchsstoff-Kreislauf besteht aus Verdampfer, Kondensator und den Verbindungsleitungen für Dampf und Kondensat. Der Versuchsstoff verdampft auf der Außenseite eines indirekt elektrisch beheizten Kupferrohres, das waagrecht in der siedenden Flüssigkeit hängt. Über die Dampfleitung gelangt der Versuchsstoff in den Kondensator, in welchem er verflüssigt wird. Im Schwerkraftumlauf wird das Kondensat in den Verdampfer zurückgeführt und dort über ein Lochblech gleichmäßig verteilt. Vor dem Eintritt in den Verdampfer wird das meist geringfügig unterkühlte Kondensat über eine stufenlos regelbare Kondensatvorheizung auf Siedetemperatur aufgewärmt.

Stationäre Betriebszustände im Versuchsstoff-Kreislauf erhält man, indem die im Verdampfer zugeführte Leistung im Kondensator wieder abgeführt wird. Zur Kühlung des Kondensators dient ein geschlossener Kreislauf, bestehend aus Rückkühler und Thermostat.

Der zylindrische Verdampfer besteht aus einem nahtlosen Edelstahlmantel (NW 300, Länge 180 mm) mit zwei Deckelflanschen, in welche Schaugläser zur Überwachung des Füllstandes und zur Beobachtung des Siedevorgangs integriert sind. Am Verdampfermantel sind Anschlußstutzen für Manometer, Widerstandsthermometer und Thermoelemente vorhanden.

### 1.2 Aufbau der Rohrheizung und des Versuchsrohres

Der Aufbau der Rohrheizung ist in Abb. 2 dargestellt. Mit einem Transformator wird eine 40 V-Wechselspannung erzeugt und mittels einer Sechspuls-Brückenschaltung gleichgerichtet. Zur Vorgabe der Heizleistung läßt sich ein Leistungssteller zwischen 0 und 20 A einregeln. Als Heizung dient ein Heizleiter der in das Versuchsrohr eingelötet ist.

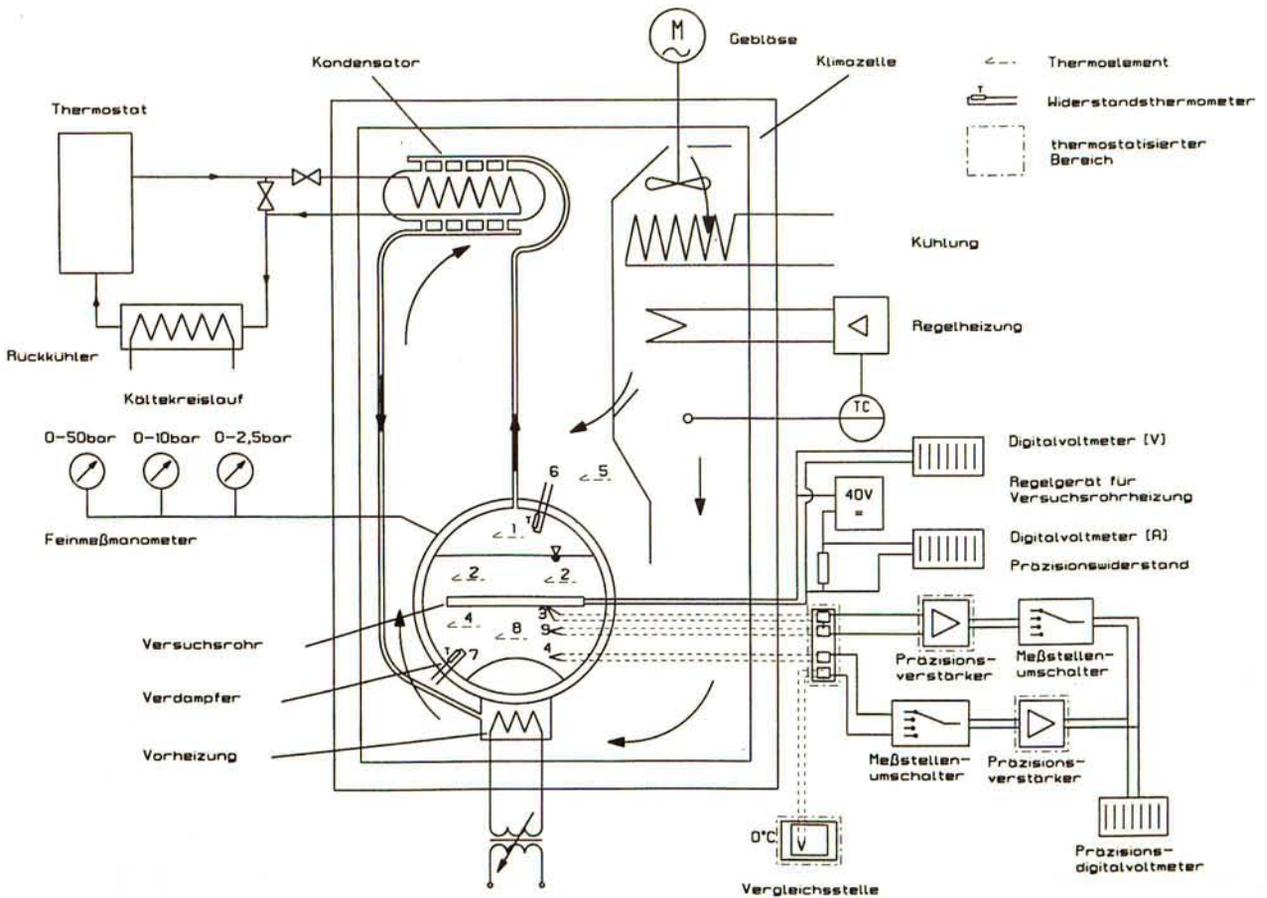


Abb. 1: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

Der Strom wird über einen 1 mΩ Shunt mit einem Voltmeter mit einer Genauigkeit von ±0,2 % ermittelt. Die Spannung wird direkt an den Enden des Heizleiters gemessen. Der gesamte auftretende Fehler zur Leistungsermittlung beträgt ±0,3 %.

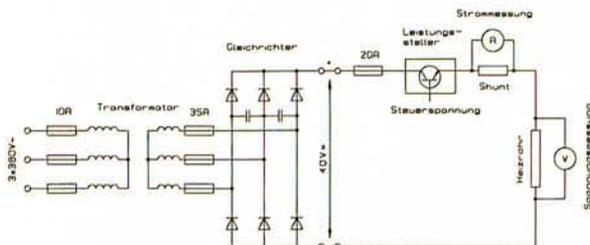


Abb. 2: Schematische Darstellung der Rohrheizung

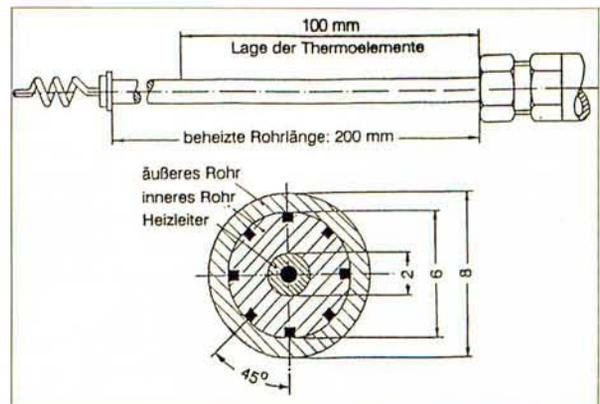


Abb. 3: Aufbau des Versuchsrohres

Das Versuchsrohr ist in Abb. 3 dargestellt. Es besteht aus zwei konzentrischen, miteinander verlöteten Rohren. Das äußere Rohr besteht aus Messing, das innere aus Kupfer. In eine axiale Bohrung des inneren Rohres ist ein Miniatur-Mantelheizelement von 2 mm Durchmesser hart eingelötet. Auf der Außenseite des inneren Rohres sind Nuten mit einer Breite und Tiefe von 0,6 mm eingegräbt, in die Miniatur-Thermoelemente mit einem Außendurchmesser von 0,5 mm weich eingelötet sind. Das Versuchsrohr wurde von Bonekamp gebaut und näher beschrieben [3].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Montagemöglichkeit für das Heizrohr verbessert: Anders als bisher muß der Versuchsstoffkreislauf beim Ein- und Ausbau des

Heizrohres nun nicht mehr demontiert werden, nachdem dafür eine Wanddurchführung geschaffen wurde.

### 1.3 Aufbau des Kühlkreislaufs

Im Rahmen dieser Arbeit ist der Kühlkreislauf vollkommen erneuert worden (Abb. 4). Anstelle des Kreislaufes mit Pumpe, elektrischer Heizung, Pufferbehälter und Temperaturregelstrecke [2] wurde ein handelsüblicher Thermostat der Firma Julabo Typ SC12 eingesetzt. Er ist im Regelverhalten wesentlich genauer und schneller und außerdem bedeutend geräuschärmer als der alte Kreislauf.

Die vom Kondensator kommende Kühlflüssigkeit durchströmt, zum Abführen der aufgenommenen Wärme, zuerst einen im Rahmen dieser Arbeit selbstgebauten Doppelrohrkühler. In dem nachgeschalteten Thermostat, mit



einer Temperaturgenauigkeit von 0,1 K und einer Temperaturkonstanz von  $\pm 0,01$  K, wird die Kühlflüssigkeit wieder auf die gewünschte Solltemperatur erwärmt und mit der integrierten Pumpe im Kreis gefördert. Es können verschiedene Kühlflüssigkeiten verwendet werden. Zur Anwendung kommen je nach Temperaturbereich Ethandiol aq. und Siliconöl Ultra-Therm RDS 50. Mit Hilfe eines, über ein Ventil zu öffnenden Bypasses läßt sich die aus dem Kondensator abzuführende Wärmemenge, bei gleicher Kühlmitteltemperatur, verringern und damit feinregeln.

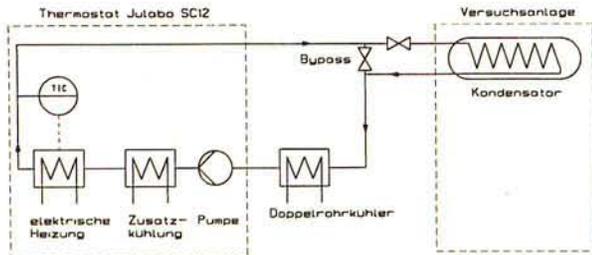


Abb. 4: Schematische Darstellung des Kühlkreislaufes für den Kondensator

### 1.4 Klimazelle

Der gesamte Versuchsstoff-Kreislauf steht in einer Klimazelle, deren Lufttemperatur genau auf die jeweilige Siedetemperatur eingestellt wird. Dazu wird die Luft mittels eines Radiallüfters über einen Kühler mit nachgeschalteter Regelheizung umgewälzt. Die Klimazellen-temperatur wird mit einem Platin-Widerstandsfühler Pt 500 gemessen. Sie wird mit dem Sollwert eines Potentiometers verglichen und über die Zweipunktregelung einer dreistufigen elektrischen Heizung geregelt. Reststörungen aufgrund regelungsbedingter Temperaturschwankungen werden durch eine zusätzliche Isolierung des Versuchsstoff-Kreislaufs innerhalb der Klimazelle weiter vermindert. Die zeitliche Schwankung der Lufttemperatur in der Klimazelle beträgt maximal  $\pm 0,02$  K.

## 2 Beschreibung der Meßtechnik

Zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  beim Sieden müssen gemäß der Definition von

$$\alpha = \frac{\dot{q} [W / m^2]}{\Delta T [K]} \tag{1}$$

der durch das Heizflächenelement tretende Wärmestrom  $\dot{q}$  und die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen diesem Flächenelement und der siedenden Flüssigkeit bekannt sein.

### 2.1 Ermittlung der Wärmestromdichte

Die mittlere Wärmestromdichte  $\dot{q}$  wird aus der bekannten Heizfläche und durch eine getrennte Strom- und Spannungsmessung am Heizleiter des Versuchsrohrs ermittelt, wie in Abb. 1 dargestellt. Das Versuchsrohr wird aus Gründen geringerer Störspannungsfelder mit Gleichstrom beheizt. Die Heizleistung ist von 0 bis 800W stufenlos einstellbar. Dies entspricht bei dem verwendeten Heizrohr einer Wärmestromdichte von 0 bis  $1,6 \cdot 10^5$  W/m<sup>2</sup>. Bei der Berechnung des effektiv zum Sieden verwendeten Wärmestromes wird der Span-

nungsabfall an den insgesamt 560 mm langen kalten Enden des Heizleiters über das bekannte Verhältnis der Widerstände

$$\frac{R_{\text{Heizleiter}}}{l_{\text{Heizleiter}}} = \frac{R_{\text{kalttes Ende}}}{l_{\text{kalttes Ende}}} \cdot 20 \tag{2}$$

gemessen. Daraus ergibt sich:

$$\dot{q} = \dot{q}_{\text{eff}} = 0,877 \cdot \dot{q}_{\text{exp}} \tag{3}$$

### 2.2 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung sind in der Standard-Siedeapparat zum einen Thermoelemente vom Typ K, d. h. NiCr-Ni, sowie auch Widerstandsthermometer Pt 100 eingebaut.

Für die Bestimmung der Rohrwandüberhitzung  $\Delta T$  befinden sich zum einen Thermoelemente in der Flüssigkeit des Verdampfers und zum anderen sind Thermoelemente in die Oberfläche des Versuchsrohrs eingelassen (Pos. 9 bzw. 3 in Abb. 1). Die Temperaturdifferenz wird durch Zusammenschalten jeweils eines Thermoelementepaares vom Rohr und aus der Flüssigkeit ermitteln, wie in Abb. 1 dargestellt. Die Thermospannung wird mit einem Präzisionsverstärker, bei einer Genauigkeit von 0,2 %, um das 1000fache verstärkt und anschließend über einen Meßstellenumschalter an ein Präzisionsvoltmeter weiter gegeben und angezeigt. Ein neues Präzisionsvoltmeter der Firma Keithley mit einer 7stelligen Anzeige ermöglicht eine Auflösung der Temperaturanzeige von  $\pm 0,001$  K.

Die effektiv gemessene Thermospannung wird zweifach korrigiert. Zum einen wird der Rohwert der Thermospannung bei abgeschalteter Versuchsrohrheizung abgezogen, die sogenannte „Nullpunktkorrektur“:

$$U_{\text{eff}} [mV] = U_{\text{exp}} - U_{\dot{q}=0} \tag{4}$$

Zum anderen wird diese effektive, über die Thermospannungskurve auf Kelvin umgerechnete Temperaturdifferenz um das Temperaturgefälle in der Heizrohrwand von der Meßstelle im Heizrohr bis zur Phasengrenze verringert.

$$\Delta T = \Delta T_{\text{eff}} (U_{\text{eff}}) - \Delta T_{\text{Rohr}} \tag{5}$$

$$\Delta T_{\text{Rohr}} = 1,151 \cdot 10^{-5} \cdot \dot{q}$$

Dampf- und Flüssigkeitsabsoluttemperatur werden mit Platin-Widerstandsfühlern (6 bzw. 7), welche auf  $\pm 0,1$  K geeicht sind, gemessen. Die Auflösung beträgt 0,002 K. Weiterhin sind Thermoelemente zur Messung der Dampftemperatur (1), der Flüssigkeitstemperatur oberhalb und unterhalb des Versuchsrohres (2 bzw. 4), sowie in der Klimazelle (5) angebracht. Zur Ermittlung der Absoluttemperatur sind deren kalte Enden in der Eiszelle thermostatisiert. Die bisherige Vergleichsstelle wurde durch einen neuen Eispunktthermostaten vom Typ ZEREF 700 der Firma Isotech mit einer Temperatur von  $-0,002^\circ\text{C}$  und einer Genauigkeit von  $\pm 0,01$  K, ersetzt. Aufgrund der bekannten Vergleichstellentempe-



ratur ist die gemessene Thermospannung ein Maß für die Absoluttemperatur in °C. Die Thermospannungen werden über einen Meßstellenumschalter und einen gemeinsamen Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor 1000 zum Präzisionsvoltmeter geleitet und angezeigt.

### 2.3 Druckmessung

Für die Druckmessung werden Präzisionsmanometer Klasse 0,1 der Firma Heise eingesetzt. Je nach Meßbereich kann auf ein passendes Manometer umgeschaltet werden (Abb. 1).

## 3 Inbetriebnahme und Kontrollmessungen mit Ethanol

Als Versuchsstoff wird handelsübliches, mit 1 % Methyl-ethylketon vergälltes Ethanol verwendet. Die Inbetriebnahme der Versuchsanlage erfolgt durch allmähliches Aufheizen so, daß die Klimazellentemperatur immer etwa 5 K wärmer als der Versuchsstoff ist. Bei Erreichen des gewünschten Druckes wird die Klimazellen- der Versuchsstofftemperatur angeglichen. Der Versuchsdruck wird dadurch konstant gehalten, daß die Temperatur des Kühlmediums dem durch das Heizrohr zugeführten konstanten Wärmestrom angepaßt wird.

Der Versuch wurde bei einer von 44,4 bis 0,62 kW/m<sup>2</sup> fallenden Wärmestromdichte und einem konstanten Druck von 1016 h Pa durchgeführt. Wärmestromdichte und Rohrwandüberhitzung wurden wie in Kapitel 2.1 und 2.2 beschrieben ermittelt.

Tabelle 1 enthält örtliche Einzelmeßwerte für die Temperatur im Versuchsstoffkreislauf.

$\dot{q}[\text{kW}/\text{m}^2]$	T [°C]					
	Einzelmeßwerte Flüssigkeit		Mittelwert Flüssigkeit	Dampf	Berechnet NRTL	Berechnet [6]
1	2		3	4	5	6
21,864	78,92	78,40	78,56	78,41	78,57	78,21
10,978	78,98	78,31	78,47	78,40	78,54	78,21
5,460	79,09	78,43	78,50	78,50	78,63	78,24
2,808	79,11	78,44	78,54	78,51	78,65	78,31
1,241	79,14	78,45	78,65	78,54	78,70	78,34
0,627	79,18	78,41	78,70	78,52	78,70	78,37
Mittelwert über alle Wärmestromdichten			78,63	78,28		

Tab. 1: Vergleich der mit Thermoelementen gemessenen Absoluttemperaturen in Dampf und Flüssigkeit mit der Sattdampf-temperatur von reinem Ethanol bei 1016 mbar

Die Einzelmeßwerte weichen von den Mittelwerten in der Flüssigkeit um höchstens 0,48 K ab. Diese lokalen Temperaturunterschiede gehen deutlich über die Fehlergrenze der Temperaturmessung hinaus. Sie sind erklärbar durch die bei dieser ersten Kontrollmeßreihe abgeschalteten Kondensatorheizung und ggfs. Ungenauigkeiten bei der Feineinstellung der einzelnen Beharrungszustände. Im Vergleich zu den Mittelwerten in der Flüssigkeit liegt die Temperatur im Dampf wie erwartet systematisch um  $\approx 0,35$  K tiefer. Zum Vergleich enthält die Tabelle auch berechnete Werte nach NRTL und nach der Antoine-Gleichung (Spalten 5 bzw. 6), die gut miteinander übereinstimmen. Die Abweichung zwischen Dampf-temperatur und Rechenwerten lassen sich durch die

technische Reinheit des Versuchsstoffes erklären. Messungen mit reinem Ethanol und definierten binären Mischungen sind vorgesehen.

Tabelle 2 enthält typische Einzelmeßwerte der Rohrwandüberhitzung bei zwei Wärmestromdichten. Die maximale Abweichung vom Mittelwert beträgt 2,85 % bei der hohen und 2,59 % bei der niedrigen Wärmestromdichte für das Thermoelement Nr. 3. Die Abweichung der anderen Einzelmeßwerte vom Mittelwert sind wesentlich geringer. Es wird durch Kontrollmessungen auch bei anderen Drücken und damit geringeren Rohrwandüberhitzungen zu überprüfen sein, ob die Meßstelle intakt ist und bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden darf.

$\dot{q}[\text{kW}/\text{m}^2]$	$\Delta T$ -Einzelwerte, Thermoelement - Nr.						Mittelwert
	2	3	4	5	6	7	$\Delta T$ [K]
44,359	13,044	12,625	13,181	13,022	13,007	13,097	12,996
2,808	7,424	7,223	7,449	7,424	7,374	7,600	7,415

Tab. 2: Vergleich der Einzelwerte der Rohrwandüberhitzung mit dem Mittelwert über den Rohrumfang

Die Wärmeübertragungsmessungen sind in Abb. 5 doppeltlogarithmisch dargestellt. Im Einklang mit der Literatur [5] ergibt sich für den Bereich des vollaussgebildeten Blasensiedens eine exponentielle Abhängigkeit des WÜK von der Wärmestromdichte,  $\alpha \sim \dot{q}^n$ , mit  $n = 0,9$ , ermittelt als Steigung der Ausgleichsgeraden durch die Meßpunkte. Zum Vergleich läßt sich  $n$  auch empirisch errechnen nach der bekannten Beziehung:

$$n = 0,9 - 0,3 \cdot p^{*0,3} \quad \text{mit } p^* = p/p_c \quad (6)$$

Die Abweichung der gemessenen von der nach [5] errechneten Steigung beträgt ca. 10 %. Für den Bereich des stillen Siedens bei kleinen Wärmestromdichten ergibt sich qualitativ ebenfalls die zu erwartende lineare Abhängigkeit in doppeltlogarithmischer Darstellung mit einer Steigung  $\sim 1/6$ . Zu erwarten wäre eine Steigung von 1/4 bis 1/5 [4]. Die Abweichung läßt sich im wesentlichen dadurch erklären, daß die Kondensatorheizung bei diesen Kontrollmessungen nicht eingeschaltet war und damit ein leicht unterkühltes Kondensat in den Verdampfer einströmte. Dies macht sich insbesondere im Bereich des stillen Siedens bemerkbar.

Die Absolutwerte des WÜK liegen geringfügig unter dem in [5] für  $\dot{q} = 20 \text{ kW}/\text{m}^2$  und  $p^* = 0,1$  angegeben und vergleichbar umgerechneten Wert. Die Abweichung der eigenen Messungen beträgt bei  $\dot{q} = 44,4 \text{ kW}/\text{m}^2$  ca. 5 %, bei  $\dot{q} = 21,9 \text{ kW}/\text{m}^2$  ca. 14 % vom umgerechneten experimentellen Wert aus [5]. Für den untersuchten Versuchsstoff ist dieses Ergebnis plausibel, da bei Gemischen mit einer konzentrationsabhängigen Verringerung des WÜK im Vergleich zur reinen Komponente zu rechnen ist. Die eigenen Meßwerte liegen aber noch innerhalb der Schwankungsbreite, die sich zwischen Messung und Rechnung nach [5] (gestrichelt bzw. strichzweipunktierte Gerade in Abb. 5) ergibt.

Anzumerken ist, daß die von verschiedenen Autoren in der Literatur für Ethanol angegebenen  $\alpha$ -Meßwerte erheblich voneinander abweichen. So z. B. findet man für



$p = 1 \text{ bar}$  und  $\dot{q} = 10^5 \text{ W/m}^2$  folgenden Wert in der Literatur [1] (als ca.-Werte aufgeführt):

Autor	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	umgerechnet mit (6) auf $\dot{q} = 44,4 \text{ kW/m}^2$	Abweichung $\frac{\alpha_{Lit} - \alpha_{exp}}{\alpha_{exp}} \cdot 100\%$
Grigorev u. Usmanov	6.200	5285	48,3
Preußner	5.000	4262	19,6
Tolubinskiy et al.	4.800	4091	14,8
Happel	9.000	7672	115,3

Tab. 3: Meßwerte verschiedener Autoren für Ethanol bei  $p = 1 \text{ bar}$  und  $\dot{q} = 10^5 \text{ W/m}^2$  und Vergleich mit den eigenen Meßergebnissen

### Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine an der Universität Karlsruhe entwickelte Präzisionsapparatur für Wärmeübergangsmessungen beim Sieden in Betrieb genommen. Dabei wurde für die Temperaturmessung eine neue Vergleichsstelle für Thermoelemente installiert, der Kühlkreislauf erneuert und dabei wesentlich verbessert und der Ein- und Ausbau des Heizrohres durch eine konstruktiv geänderte Wanddurchführung wesentlich erleichtert. Die Kontrollmessungen mit Ethanol bestätigen die Funktionsfähigkeit der Apparatur.

Folgende Arbeiten sind noch geplant:

- Montage von Probenahmeschleusen und Anbindung an den Gaschromatographen zur Messung von Dampf- und Flüssigkeitskonzentrationen.
- Wärmeübergangs- und Phasengleichgewichtskontrollmessungen an ausgewählten Gemischen
- Anschluß der Siedeapparatur an das Prozeßleitsystem (PLS) Contronic P zwecks Erfassung von Siededruck, Klimazellen-, Versuchsstoff-, Kühlkreislauftemperatur und der Rohrwandüberhitzung zur Überwachung der Versuchsanlage sowie zur Meßdatenerfassung und -auswertung.

- Meßtechnische Ausstattung des Kondensators zwecks Bilanzierung der Kondensationswärme

**Danksagung:** Für die finanzielle Unterstützung dieses Forschungsvorhabens sind wir dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie zu Dank verpflichtet.

### Literatur

- J. Schmadl: Wärmetübertragung beim Blasensieden binärer Stoffgemische unter hohem Druck, Dissertation Universität Karlsruhe, 1982.
- J. Goetz: Entwicklung und Erprobung einer Normapparatur zur Messung des Wärmeübergangs beim Blasensieden, Dissertation Universität Karlsruhe, 1980.
- S. Bonekamp: Einfluß von Ultraschall auf den Wärmeübergang beim Blasensieden binärer Gemische, Dissertation Universität Karlsruhe, 1997.
- D. Gorenflo: Zum Wärmeübergang bei der Blasenverdampfung an Rippenrohren, Dissertation Technische Hochschule Karlsruhe, 1966.
- VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage VDI-Verlag Düsseldorf, 1994.
- U. Onken und W. Arlt: Recommended Text Mixtures for Distillation Columns, sec. edition, the Institution of Chemical Engineers, G. E. Davis Bulding, Warwickshire.

### Verfasser

**Prof. Dr.-Ing. Josef Schmadl**  
**Dipl.-Ing. (FH) Peter Ignaszewski**  
 Technische Fachhochschule Wildau  
 Fachbereich Ingenieurwesen/Wirtschaftsingenieurwesen  
 Tel. (0 33 75) 507-110  
 E-mail: jschmadl@igw.tfhwildau.de

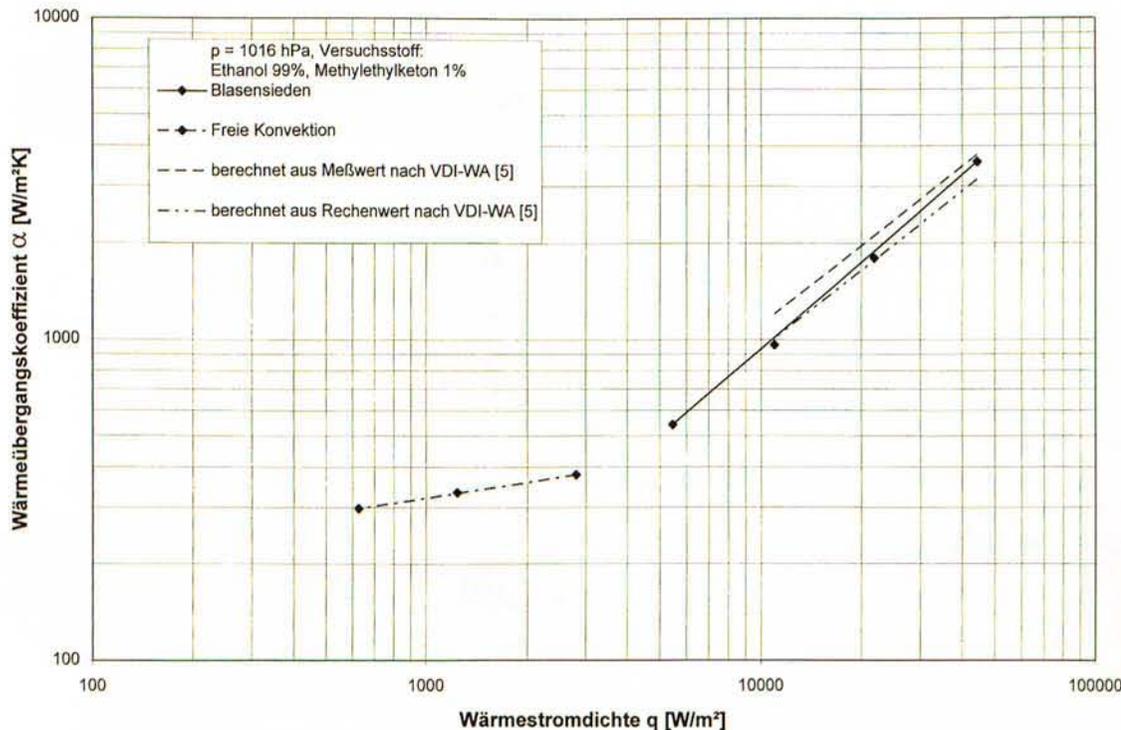


Abb. 5: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte bei  $p = 1016 \text{ mbar}$