

## DKV-Forschungsbericht Nr. 70

Elisabeth Danger

Wärmeübergang und Blasenbildung  
beim Sieden

2004

978-3-932715-73-0



### Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Wärmeübergang und die Blasenbildung beim Sieden von Propan, R134a und Isopropanol untersucht. Als Heizelemente dienen zwei im Verdampfer horizontal angeordnete Kupferrohre mit unterschiedlichen Durchmessern (25,4 mm und 8,04 mm) und unterschiedlich bearbeiteter Oberfläche: feinsandgestrahlt für das 25-mm Rohr, geschmirgelt bzw. feinsandgestrahlt für das 8-mm Rohr.

Das 25-mm Rohr ist besonders für die Untersuchung des *örtlichen* Wärmeübergangs geeignet, da nahe der Oberfläche über den Umfang verteilt 36 Thermoelemente in zwei axial zueinander versetzten Rohrquerschnitten (Haupt- und Nebenmeßebene) angeordnet sind, wodurch *lokale* Rohrwandüberhitzungen  $\Delta T_i$  in Abhängigkeit vom Umfangswinkel  $\varphi$  des Rohres gemessen werden können.

Vergleichsmessungen zwischen der feinsandgestrahlten und der geschmirgelten Oberfläche des 8-mm Rohres werden zur Untersuchung des Einflusses der Rohrgeometrie auf Wärmeübergang und Blasenbildung benutzt.

Für die Wärmeübergangsmessungen wird die Wärmestromdichte  $q$  von sehr kleinen Werten im Bereich der freien Konvektion ohne Blasen bis zu Werten von  $100 \text{ kW/m}^2$  mit intensiver Blasenbildung variiert. Durch die unterschiedliche Lage der zu den Versuchsstoffen gehörenden Dampfdruckkurven kann in dem durch die Versuchsanordnung zugänglichen Temperaturfeld der Druckeinfluss auf den Wärmeübergang innerhalb weiter Grenzen des auf den kritischen Druck normierten Siededruckes  $p^* = p_s/p_c$  untersucht werden: für Propan und R134a von ca. 5 % bis hin zu 80 % des kritischen Druckes, für Isopropanol von ca. 0,7 % bis 15 %.

Die **Blasenbildung** der Versuchsstoffe wird mit Hilfe einer Video-Hochgeschwindigkeitskamera im 1ms-Takt dokumentiert. Dabei wird die Wärmestromdichte bei  $p^* = 0,1$  von  $q = 1,5$  bis maximal  $50 \text{ kW/m}^2$  variiert und zusätzlich für Propan bei  $p^* = 0,2$  bis maximal  $20 \text{ kW/m}^2$ . Videoaufnahmen bei höheren Wärmestromdichten und Siededrucke sind mit der verfügbaren Optik und Beleuchtung nur bedingt auswertbar.

Jede Videosequenz mit einer Aufnahmedauer von 500 ms wird in 500 Einzelbilder zerlegt. Mit Hilfe eines neu entwickelten Auswertprogrammes wird das Blasenbildungsverhalten jeder sichtbaren Keimstelle sowie die Beeinflussung zwischen Nachbarkeimstellen analysiert.

Für alle drei Versuchsstoffe nimmt die Keimstellendichte  $N/A$  am feinsandgestrahlten 25-mm Rohr mit wachsender Wärmestromdichte in gleicher Weise zu; dabei wird zwischen *kumulierten* Keimstellen  $N_{\text{kum}}$ , welche per Definition die *Summe* aller aktiven Keimstellen aus den untersuchten

500 Einzelbildern (entsprechend 500 ms) sind, und *momentanen* Keimstellen  $N_{\text{mom}}$ , welche die gemittelte Anzahl der *gleichzeitig* aktiven Keimstellen je Einzelbild (1 ms) angeben, unterschieden.

Die kumulierten Keimstellendichten sind für alle Versuchsstoffe sehr viel größer als die momentanen, und ihr relativer Anstieg ist mit wachsender Wärmestromdichte stärker als derjenige der momentanen. Dieser Effekt beruht darauf, daß mit steigender Wärmestromdichte und zunehmender Grenzschichtüberhitzung  $\Delta T$  auch der Überdruck  $\Delta p$ , welcher aus  $\Delta T$  über die Steigung  $dp/dT$  der Dampfdruckkurve folgt, zunimmt. Durch diesen höheren Überdruck können kleinere Blasen in entsprechend kleineren Vertiefungen der Rauigkeitsstruktur der Heizfläche zur Blasenbildung angeregt werden. Da in der Mikrostruktur der feinsandgestrahlten Oberfläche die Anzahl ähnlicher Vertiefungen mit abnehmender Größe deutlich zunimmt, stehen im Bereich der kleinen insgesamt wesentlich mehr *potentielle* Keimstellen zur Verfügung, die je nach lokaler Überhitzung abwechselnd oder gleichzeitig zur Blasenbildung aktiviert werden können.

Die Absolutwerte der kumulierten und momentanen Keimstellendichten von Isopropanol erreichen bei beginnendem Blasensieden nur 10 – 20 % der entsprechenden Werte von Propan oder R134a; gleichzeitig ist der mittlere Blasenabreißdurchmesser von Isopropanol zwei bis dreimal so groß wie bei den beiden anderen Stoffen. Dieser Effekt folgt aus der mit 12,4 mN/m deutlich höheren Oberflächenspannung  $\sigma$  von Isopropanol, während die nur geringen Unterschiede der Keimstellendichten von Propan und R134a mit den fast gleichen  $\sigma$ -Werten dieser Stoffe korrelieren (10,6 bzw. 10,2 mN/m). Mit steigendem  $\sigma$  nimmt bei gleicher Rohrwandüberhitzung  $\Delta T$  bzw. gleichem Überdruck  $\Delta p$  der zum stabilen Wachstum notwendige Krümmungsradius  $r$  einer Blase zu, so daß insgesamt nur wenige große Vertiefungen zur Blasenbildung angeregt werden können. Auch die Zunahme des normierten Siededruckes von  $p^* = 0,1$  auf  $p^* = 0,2$  führt am Beispiel von Propan zu höheren Absolutwerten der Keimstellendichte und zu kleineren Abreißdurchmessern, was sich ebenfalls auf die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Stoffdaten zurückführen läßt.

Der Einfluß des Rohrdurchmessers auf die Blasenbildung wird durch den Vergleich der Videoaufnahmen am feinsandgestrahlten 25-mm bzw. 8-mm Rohr untersucht. Während der Blasenabreißdurchmesser bei beiden Rohren annähernd gleich und der relative Anstieg von  $N/A$  mit steigender Wärmestromdichte jeweils ähnlich ist, sind bei  $q = \text{const}$  die Absolutwerte im Fall der momentanen Keimstellendichten für das 8-mm Rohr bis zu fünfmal, im Fall der kumulierten sogar bis zu zehnmal höher. Ursache hierfür ist der beim 25-mm Rohr erhöhte Zusatzwärmeübergang durch Konvektion und Verdampfung in die hochgleitenden Blasen, die in Höhe der Flanke im Mittel vermehrt und größer sind als beim kleinen. Er übt eine stärkere Kühlwirkung aus und läßt dadurch nur an einer geringeren Zahl von Rauigkeitsvertiefungen die kurzzeitig hohe Überhitzung zu, welche zur Keimstellenaktivierung notwendig ist.

Der Vergleich der Blasenbildung von Propan an der geschmirgelten bzw. feinsandgestrahlten Oberfläche am 8-mm Kupferrohr ergibt bei  $p^* = 0,1$  im Bereich beginnenden Blasensiedens bezüglich sämtlicher Blasenbildungsparameter deutliche Unterschiede: Die kumulierten Keimstellendichten sind für die geschmirgelte Oberfläche wesentlich kleiner als für die feinsandgestrahlte, während die momentanen gleich sind. Dabei ist die Wachstumszeit  $t_w$  der einzelnen Blasen bis zu ihrer Ablösung von der Keimstelle bei der geschmirgelten Oberfläche um ein Vielfaches höher als bei der feinsandgestrahlten; Gleiches gilt für die Anzahl von Blasenzyklen  $N_b$  je Keimstelle während der Dauer einer Videosequenz.

Ursächlich hierfür sind wenige größere Riefen in der geschmirgelten Oberfläche, deren Öffnung nach außen verengt ist und so im Vergleich zu den gleichmäßig verteilten kleinen Vertiefungen in der feinsandgestrahlten relativ große Dampfreste beim Ablösen einer Blase zurückhalten. Diese mit Dampf gefüllten Vertiefungen stehen dem Abtransport der Wärme bei kleinen Wärmestromdichten zur Verfügung, und der Einflußbereich der zugehörigen, vergleichsweise großen Blasen senkt die lokale Überhitzung in einem größeren Einflußbereich und verhindert somit die Aktivierung anderer benachbarter potentieller Keimstellen.

Mit wachsender Wärmestromdichte verringern sich die Unterschiede in  $(N/A)_{\text{kum}}$ ,  $t_W$  und  $N_B$  zwischen der feinsandgestrahlten und geschmirgelten Oberfläche kontinuierlich und verschwinden schließlich durch die Wirkmechanismen der in zunehmender Zahl an der Rohroberfläche hochgleitenden Blasen. Die Auswertung am 25-mm Rohr zeigt im Vergleich zur feinsandgestrahlten Oberfläche des 8-mm Rohres keinen Einfluß des Rohrdurchmessers auf diese drei Parameter.

Die **örtliche Blasenbildung** wird für Propan anhand von Messungen zum Abreißdurchmesser  $d_A$ , die den einzelnen Keimstellen auf dem Rohrumfang zugeordnet sind, beim normierten Druck  $p^* = 0,1$  an beiden Versuchsrohren untersucht. Trotz der großen Streuung der zu einer einzelnen Keimstelle gehörenden Abreißdurchmesser um ihren Mittelwert wird bei verhältnismäßig kleinen Wärmestromdichten eine systematische Tendenz zu einem Minimum in  $d_A$  an der Rohrflanke festgestellt. Die auftriebsbedingte Strömung der von unten kommenden Blasen führt bei den an der Flanke in mittlerer Höhe gerade anwachsenden Blasen im Mittel zu einem früheren Abriß, und der Effekt ist dort am größten, weil die Blasen hier direkt an der Wand hochgleiten und ihre Anzahl größer ist als weiter unten. Oberhalb der Rohrflanke können die Blasen bei abnehmendem Konvektionseinfluß ungestörter wachsen, und unten haften sie zusätzlich wegen der gegen die Rohrwand gerichteten Komponente der Auftriebskraft länger.

Die Untersuchung des zeitlichen Aktivierungsverhaltens der einzelnen Keimstellen in Abhängigkeit vom Umfangswinkel ergibt für das 25-mm Rohr, daß unabhängig von  $\varphi$  die meisten Keimstellen während einer Bildsequenz von 500 ms nur einmal aktiv sind, einige mehrfach und nur wenige sehr häufig zu Blasenbildungszyklen angeregt werden. Dieses Verhalten bleibt auch mit wachsender Wärmestromdichte erhalten, was auf die sehr homogene Rauigkeitsstruktur des feinsandgestrahlten 25-mm Kupferrohres zurückzuführen ist.

Der **integrale** (über den Rohrumfang gemittelte) **Wärmeübergang** zeigt an beiden Verdampferrohren den bekannten Zusammenhang zwischen dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und der Wärmestromdichte  $q$  mit einem schwachen Anstieg von  $\alpha$  mit  $q$  im Bereich der freien Konvektion ohne Blasenbildung und mit deutlich steilerem Anstieg beim Blasensieden. Dies gilt für die untersuchten drei Stoffe in gleichem Ausmaß, sofern man bei jeweils gleichem *normierten* Siededruck  $p^*$  vergleicht; sogar die Absolutwerte von  $\alpha$  sind (am 25-mm Rohr) für die drei Stoffe innerhalb der Meßgenauigkeit fast gleich.

Der Einfluß des *Rohrdurchmessers* auf den mittleren Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  macht sich bei R134a insbesondere bei kleinen  $q$ -Werten im Bereich des beginnenden Blasensiedens durch eine schwache, systematische Tendenz zu höheren Wärmeübergangskoeffizienten mit wachsendem Rohrdurchmesser bemerkbar. Dies ist darauf zurückzuführen, daß im Bereich des beginnenden Blasensiedens der Wärmeübergang mit größer werdendem Durchmesser durch konvektive Verbesserungen leicht ansteigt, vor allem durch Zusatzverdampfung in die hochgleitenden Blasen auf ihrem längeren Weg entlang des Rohrumfangs, während diese konvektiven Effekte zu hohen Wärmestromdichten hin an Bedeutung verlieren.

Untersuchungen zum Einfluß der Mikrostruktur der Heizfläche auf den Wärmeübergang anhand der geschmirgelten bzw. feinsandgestrahlten Oberfläche des 8-mm Kupferrohres ergeben für Propan, daß die  $\alpha$ -Werte für die geschmirgelte Oberfläche besonders für niedrige Wärmestromdichten nahe dem Übergang zur freien Konvektion ohne Blasen und besonders bei mittleren normierten Drücken um  $p^* = 0,1$  deutlich höher liegen als für die feinsandgestrahlte und der Anstieg von  $\alpha$  mit  $q$  flacher ist. Nahe der *höchsten* experimentell untersuchten Wärmestromdichte von  $100 \text{ kW/m}^2$  reduziert sich der relative Unterschied in  $\alpha$  auf ca. 15 %. Analoge Tendenzen werden in der Literatur in abgeschwächter Form für Verdampferrohre aus Baustahl beschrieben.

Die systematische Variation des **örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten** in Abhängigkeit vom Umfangswinkel  $\varphi$  am 25-mm Versuchsrohr dokumentiert für alle drei Versuchsstoffe und beide Meßebenen bei mittleren und hohen Wärmestromdichten den Einfluß der an der Wand horizontaler Verdampferrohre hochgleitenden Blasen auf den Wärmeübergang: Im Bereich des beginnenden Blasensiedens ist die Rohrwandüberhitzung längs des Rohrumfangs konstant, da die durch

Konvektion und Verdampfung der wenigen Blasen mögliche *lokale* Absenkung von  $\Delta T$  durch die gute azimuthale Wärmeleitung in der Rohrwand aus Kupfer verhindert wird.

Mit wachsender Wärmestromdichte  $q$  bildet sich nahe der unteren Mantellinie des Rohres ( $180^\circ$ ) allmählich ein Minimum in  $\Delta T$  aus, das bei mittleren  $q$ -Werten am größten ist und bis zu 10 % unter dem jeweiligen Mittelwert liegt, bis es zu hohen Wärmestromdichten hin wieder zu verschwinden beginnt; hier ist die gesamte Heizfläche dicht mit aktiven Blasenbildungszentren, die sehr gute lokale Wärmeübergangsbedingungen bewirken, belegt.

Ab einer Wärmestromdichte von etwa  $q = 20 \text{ kW/m}^2$  sind die Minima einer tatsächlichen Verbesserung des Wärmeübergangs zuzuschreiben, da für die beiden untersuchten Rohre die *mittleren* Überhitzungen der Rohrwand bei mittleren und hohen Wärmestromdichten nahezu gleich sind. An der Oberseite des großen Rohres findet dagegen durch schwächer werdende Konvektionseinflüsse und verstärkte Anreicherung überhitzter Flüssigkeit in Rohrwandnähe eine Verschlechterung statt.

Bei Wärmestromdichten unter  $20 \text{ kW/m}^2$  (bis zur freien Konvektion ohne Blasenbildung) ist der lokale Wärmeübergang am gesamten Umfang des 25-mm Rohres besser als am 8-mm Rohr, da die  $\Delta T, q$ -Variationsbreite am 25-mm Rohr kleiner ist als der Unterschied in den gemittelten  $\alpha$ -Werten der beiden Rohre.

Mit zunehmendem normierten Druck  $p^*$  verlagert sich das Minimum von  $\Delta T$  tendenziell zu niedrigeren  $q$ -Werten, wobei sich für  $p^* = 0,8$  die Abweichung des Minimums vom Mittelwert mit 24 mK auf die Größenordnung der unsystematischen  $\Delta T$ -Streuung reduziert.

Bei *sehr tiefen* normierten Drücken unterhalb von 5 % des kritischen Drucks ist die  $\Delta T, q$ -Variation nicht mehr nachweisbar. Die Blasenbildung in den Mikrovertiefungen der Heizflächenrauigkeit ist durch den notwendigen großen Überdruck derart erschwert, daß erst sehr große Überhitzungen zu Blasenwachstum führen. Beginnt eine Blase unter diesen Bedingungen an einer aktiven Keimstelle zu wachsen, so geschieht das wegen der hohen Flüssigkeitsüberhitzung so vehement und wegen der großen Dicke der überhitzten Grenzschicht in so großer räumlicher Ausdehnung, daß für die aktiven Keimstellen die *Lage am Rohrumfang* praktisch bedeutungslos wird.