

DKV-Forschungsbericht Nr. 46

Peter Sokol

Untersuchungen zum Wärmeübergang beim Blasensieden an Glatt- und Rippenrohren mit großen Außendurchmessern

1994

978-3-922429-47-0



Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Wärmeübergang beim Blasensieden der Kohlenwasserstoffe Propan und n-Hexan an der Außenseite von horizontalen Glatt- und Rippenrohren mit Außendurchmessern von ca. 90 mm untersucht, von denen ein Glattrohr geschmirgelt und die beiden übrigen Rohre in gleicher Weise sandgestrahlt waren. Die Messungen erstrecken sich über einen großen Druckbereich, der von einem Drittel des Atmosphärendruckes bis zu 80 % des kritischen Druckes reicht. Die auf die Fläche des Kernrohres bezogene Wärmestromdichte wird dabei zwischen 50 und 70 000 W/m² variiert, so dass die durch elektrisches Beheizen der Versuchsrohre eingebrachte Wärme bei hohen Wärmestromdichten über voll ausgebildetes Blasensieden und bei kleinen Wärmestromdichten und tiefen Siededrücken durch freie einphasige Konvektion abgeführt wird.

Wie von Untersuchungen an Rohren mit kleinem Durchmesser bekannt ist, nimmt α auch für die in dieser Arbeit untersuchten Glatt- und Rippenrohre mit großen Außendurchmessern im Bereich des Blasensiedens mit steigender Wärmestromdichte und wachsendem Druck kontinuierlich zu, und die Messwerte bei konstantem Druck können in doppelt logarithmischer Auftragung über weite Bereiche durch Geraden interpoliert werden.

Ein direkter Vergleich der Messwerte am geschmirgелten Glattrohr mit großem Außendurchmesser mit Ergebnissen an einem Glattrohr mit kleinem Durchmesser (7,6 mm) und gleicher Oberflächenbehandlung zeigt, dass für tiefe Siededrücke $p^* \leq 0.12$ bei hohen Wärmestromdichten kein Durchmesserinfluss feststellbar ist und der Wärmeübergangskoeffizient α am großen Rohr weniger stark abnimmt als am kleinen. Mit wachsendem Druck steigt α mit fallender Wärmestromdichte am großen Rohr schwächer als am kleinen an, so dass bereits ab $p^* \geq 0.4$ das kleine Rohr über den gesamten Belastungsbereich höhere Wärmeübergangskoeffizienten liefert.

Beide Effekte – die besseren Wärmeübergangsbedingungen bei kleinen Wärmestromdichten und tiefen Drücken und die Verschlechterung bei hohen Drücken und hohen Wärmestromdichten am großen Rohr – können durch die mit den am Rohrumfang hochlaufenden Blasen verbundenen Mechanismen erklärt werden: Bei geringer Blasendichte (tiefe Drücke und kleine Wärmestromdichten) wird der überhitzten Flüssigkeitsschicht zusätzliche Phasengrenzfläche angeboten, an der die Überhitzung durch Verdampfen aufgebaut werden kann, und zwar beim Rohr mit dem größeren Durchmesser wegen des längeren Strömungsweges mehr als beim kleineren.

Umgekehrt können die am Umfang hochlaufenden Blasen am großen Rohr auch eine verschlechternde Wirkung auf den Wärmeübergang ausüben, wenn die Blasendichte groß und die Aufstiegs geschwindigkeit bereits klein ist (hohe Wärmestromdichten, hoher Druck), weil die Zufuhr von Flüssigkeit an die Heizfläche behindert ist.

Insgesamt ist der in der vorliegenden Arbeit gefundene Durchmesserseffekt deutlich schwächer und teilweise gegenläufig zu dem, was man aus der Literaturlage folgern kann. Außerdem unterscheidet sich der Anstieg des Wärmeübergangskoeffizienten mit der Wärmestromdichte und dem normierten Siededruck nur geringfügig von dem kleinerer Rohre.

Die Versuche mit dem sandgestrahlten Glattrohr und Rippenrohr zeigen, dass das Blasensieden an diesen rauhen Oberflächen bereits sehr früh einsetzt, was jedoch keinesfalls zu einer Aktivierung sämtlicher Keimstellen führt, so dass die Hysterese an diesen Rohren – mit Ausnahme tiefer Drücke am Rippenrohr- praktisch bis zu den höchsten hier einstellbaren Wärmestromdichten reicht. Abhängig vom Aktivierungsgrad der Keimstellen werden unterschiedliche Temperaturvariationen über dem Rohrumfang ermittelt. Anhand einer Messung in der Nähe des Atmosphärendruckes, bei der durch kurzzeitiges Filmsieden eine vollständige Keimstellenaktivierung erreicht werden konnte, wird gezeigt, dass sich der Einfluss des Rohrdurchmessers auf den Wärmeübergang beim Blasensieden bei sandgestrahlten Rohren nicht von dem an geschmirgelten Rohren unterscheidet. Dabei lieferte das sandgestrahlte Glattrohr erwartungsgemäß deutlich größere α -Werte und eine geringere Abnahme von α mit fallender Wärmestromdichte als das geschmirgelte, wobei der Einfluss der Oberflächenrauigkeit bei hohen Wärmestromdichten näherungsweise durch eine einfache Umrechnung der Mittenrauigkeiten R_a erfasst wird. Weitergehende Untersuchungen am sandgestrahlten Glattrohr wurden durch einen irreparablen Defekt im Inneren dieses Rohres verhindert.

Verglichen mit den Ergebnissen am großen sandgestrahlten Glattrohr bei vollständiger Keimstellenaktivierung wurden mit dem sandgestrahlten Rippenrohr in der Nähe des Atmosphärendrucks kleinere α -Werte gemessen, wenn α auf die gesamte äußere Oberfläche bezogen wird, wobei sich der Unterschied zwischen beiden Rohren zu kleinen Wärmestromdichten hin verringert. Beides steht im Gegensatz zu dem bisher für unbehandelte Rippenrohre Bekannten, wonach Rippenrohre höhere α -Werte aufwiesen und sich der Abstand zum Glattrohr mit fallender Wärmestromdichte vergrößerte. Der Unterschied im Einfluss der Wärmestromdichte zwischen Glatt- und Rippenrohr ist für die sandgestrahlten Stahlrohre mit großen Durchmessern deutlich kleiner als zwischen Kupferglattrohren (mit geringer Rauigkeit und kleinem Durchmesser) und unbehandelten Kupferrippenrohren. Bezüglich des Einflusses des Siededruckes stimmen die Ergebnisse am großen sandgestrahlten Rippenrohr gut mit denen unbehandelter Rippenrohre und entsprechenden Korrelationen aus der Literatur überein. Aus einer Berechnung der Temperaturverteilung in den Rippen folgt, dass der Einsatz eines Stahlrippenrohres dieser Konstruktion nur bis zum halben kritischen Druck sinnvoll ist und dass bei höheren Drücken die Rippen den Wärmestrom an die siedende Flüssigkeit sogar behindern können.

Am geschmirgelten Glattrohr wird eine systematische Temperaturvariation über dem Rohrumfang gemessen, die mit zum Teil mehrere Kelvin Temperaturunterschied um Größenordnungen über der an kleinen Glattrohren liegt, bei denen ein ähnlicher Effekt nur wenige Hundertstel Kelvin betrug. Bei hohen Wärmestromdichten stellen sich an der Rohrober- und -unterseite stets Temperaturmaxima ein, und die kleinste Wandüberheizung wird an der Rohrflanke gemessen, was durch die zusätzliche Phasengrenzfläche und das frühe Blasenablösen infolge der hochströmenden Blasen bewirkt werden dürfte. Mit fallender Wärmestromdichte verringert sich vor allem die Wandüberheizung an der Rohrunterseite relativ zu den übrigen Umfangsabschnitten, so dass sich hier bei kleinen Wärmestromdichten ein Temperaturminimum einstellt. Lediglich bei tiefen Drücken $p^* \leq 0.10$ und Wärmestromdichten in der Nähe des Übergang zur freien Konvektion ohne Blasenbildung und nur wenigen Blasen an der Rohrunterseite kehrt sich dieser Verlauf um, und es bildet sich wiederum ein Temperaturmaximum an der Rohrunterseite.

Durch eine zusätzliche Anströmung des Versuchsrohres von unten mit Dampfblasen verringert sich die Wandüberheizung vor allem bei kleinen Wärmestromdichten am Versuchsrohr an der Rohrunterseite, wo die anströmenden Blasen auf die Oberfläche treffen. Bei hohen Wärmestromdichten und hoher Blasenbelegungsdichte durch aktive Keimstellen am Versuchsrohr üben die zusätzlichen Blasen dagegen keine bzw. eine den Wärmeübergang eher verschlechternde Wirkung aus.

Entsprechend führt eine zusätzliche Anströmung der Versuchsröhre mit Dampfblasen oder Flüssigkeit vor allem bei kleinen Wärmestromdichten am Versuchsröhr zu einer deutlichen Verbesserung des Wärmeübergangs, wobei der Wärmeübergangskoeffizient von der Wärmestromdichte am Versuchsröhr unabhängig ist und nur von den Anströmbedingungen abhängt, wie es vom Strömungssieden bekannt ist. Im Fall der Blasenanströmung können die Messwerte am Glatt- und Rippenröhr im konvektiv dominierten Bereich sehr gut durch ein Modell von Fujita et al. wiedergegeben werden, wobei für das Rippenröhr der Rippenwirkungsgrad in die Berechnung einbezogen werden muss. Für die Flüssigkeitsanströmung stimmt die gemessene relative Zunahme von α mit steigender Flüssigkeitsanströmung im konvektiv dominierten Bereich mit einem Berechnungsverfahren aus der Literatur überein.