

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Sieden

Vom Sieden spricht man, wenn eine Flüssigkeit an einer Wand, dessen Temperatur über der Sättigungstemperatur T_s der Flüssigkeit liegt, verdampft. In technischen Anlagen findet dies bspw. an ebenen Flächen oder an Rohren oder Rohrbündeln statt, die als Heizfläche fungieren. Die Wärmezufuhr kann sowohl durch elektrische Beheizung als auch indirekt durch einen Wärmeträger erfolgen. Tritt der Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig bei erzwungener Konvektion auf, spricht man vom Strömungssieden, wohingegen bei freier Konvektion Behältersieden auftritt. Der letztere Fall ist in der vorliegenden Arbeit von besonderer Bedeutung und wird im Folgenden im Detail erläutert.

Das Sieden von Flüssigkeiten ist ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Mechanismen, das durch zahlreiche Faktoren beeinflusst wird. Nicht zuletzt hängt der Siedevorgang von den Eigenschaften der Flüssigkeit, wie z.B. der Verdampfungsenthalpie, des Sättigungsdrucks, der Dichte, der Oberflächenspannung und der Wärmeleitfähigkeit ab. In besonderem Maße sind auch die Siedeformen von hoher Relevanz, die wiederum von der Wandtemperatur T_w abhängen. Erste Beschreibung dieser unterschiedlichen Siedeformen stammen von Nukiyama [67]. Durch wegweisende Untersuchungen zur Verdampfung von Wasser mit einem elektrisch beheizten Draht konnten die Siedeformen nicht nur optisch erkannt werden, sondern durch Ausnutzung der Temperaturabhängigkeit des Widerstands des Drahtes auch dessen Temperatur ermittelt werden. Aus den Ergebnissen entwickelte Nukiyama die nach ihm benannte Siedekurve (Abb. 2.1). Überschreitet die Wandtemperatur T_w die

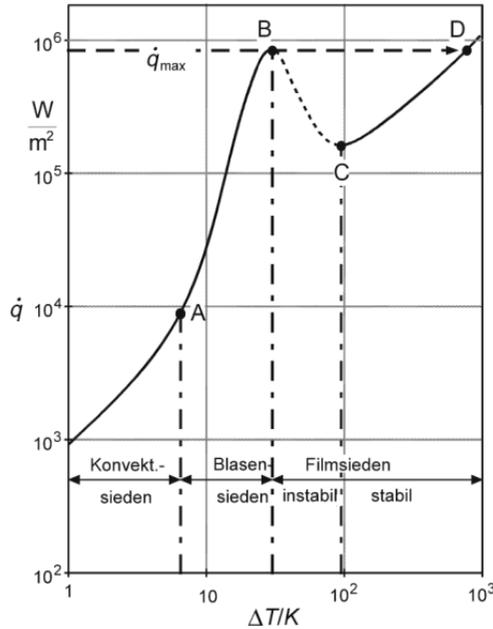


Abb. 2.1: Verlauf der Wärmestromdichte \dot{q} als Funktion der Wandüberhitzung ΔT für die Verdampfung von reinen Stoffen [59]

Sättigungstemperatur T_s der Flüssigkeit zunächst nur geringfügig tritt, wie in Abb. 2.1 gezeigt, konvektives Sieden ohne Blasenbildung auf. Hierbei treten keine Unterschiede zum gewöhnlichen einphasigen Wärmeübergang auf [2]. Wird die Wandüberhitzung ΔT weiter erhöht, beginnt der Vorgang des Blasen-siedens (Bereich A-B), welcher aufgrund vergleichsweise hoher Wärmestromdichten \dot{q} für technische Belange von besonderem Interesse ist. Steigt die Wandtemperatur T_w bei konstanten Sättigungsbedingungen weiter an, wird der Punkt B in Abb. 2.1 überschritten, der den Punkt maximaler Wärmestromdichte \dot{q}_{max} bezeichnet. Die Blasenbildung ist für die vorliegenden Wandüberhitzungen sehr intensiv, sodass Blasen miteinander koagulieren und zeit- und stellenweise die Bildung eines Dampffilms auftritt (Bereich B-C). Man spricht von partiellem Filmsieden, welches durch zusätzliche Erhöhung der Wandtemperatur in das vollständige Filmsieden (Bereich C-D) übergeht. Hierbei wird die Oberfläche von einem geschlossenen Dampf Film umgeben und die Wärmestromdichte \dot{q} sinkt zunächst auf deutlich geringere Werte ab. Eine Steigerung der

zuletzt genannten ist allerdings durch zunehmende Turbulenzen im Dampffilm und wachsenden Anteil der Strahlungswärmeübertragung bei deutlicher Anhebung der Wandtemperatur möglich. Die genannten Formen des Siedens haben gravierenden Einfluss auf die Höhe des Wärmeübergangskoeffizienten α_{verd} . Es können Unterschiede im Bereich von zwei bis drei Größenordnungen auftreten. In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften der Siedeformen und der Einfluss auf den Wärmeübergang im Detail erläutert.

2.1.1 Konvektives Sieden

Steigt die Wandtemperatur der Heizfläche um einen geringen Betrag über die Sättigungstemperatur der Flüssigkeit, bilden sich zumeist nur sehr wenige oder gar keine Dampfblasen. Die Überhitzung der Heizfläche führt vielmehr dazu, dass sich im wandnahen Bereich aufgrund von beschränkter Wärmeleitung ein signifikantes Temperaturgefälle zur umgebenden Flüssigkeit einstellt und Dichteunterschiede zu einer freien Konvektion führen. Auf- und absteigende Strömungen durchmischen die Flüssigkeit und sorgen für ein homogenes Temperaturfeld in wandfernen Bereichen. Auf diese Weise wird Wärme von der Heizfläche abtransportiert und gelangt an die Oberfläche der Flüssigkeit. Dort fungiert die Verdampfung der Flüssigkeit als Wärmesenke. Für das konvektive oder auch stille Sieden gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten in Bezug auf den Wärmeübergangskoeffizienten an der Heizfläche wie beim herkömmlichen einphasigen Wärmeübergang. Entscheidend hierfür ist die Temperaturdifferenz zwischen der heizenden Wand und der Kernströmung. Nach Jakob und Linke [42] gilt bei laminarer Konvektion für den dimensionslosen Wärmeübergang

$$Nu = 0,60(GrPr)^{1/4} \quad (2.1)$$

bzw.

$$Nu = 0,15(GrPr)^{1/3} \quad (2.2)$$

für die turbulente Konvektion. Eine Abhängigkeit vom reduzierten Druck

$$p^* = \frac{P_s}{P_{krit}} \quad (2.3)$$

konnte von Jakob und Linke [42] anhand des Kältemittels R113 nicht festgestellt werden.

Obwohl die Korrelationen auf Untersuchungen von halogenierte Kältemitteln basieren, hat Börner [12] einen Vergleich der Korrelationen mit Messungen von Wasser und Tetrachlormethan durchgeführt und die Eignung für beliebige Fluide im Prandtl-Zahl-Bereich von 2-100 und für gängige Verdampfergeometrien erweitert.

2.1.2 Blasensieden

Eine deutliche höhere Relevanz für technische Anlagen hat das Blasensieden. Dieses tritt bei zunehmender Überhitzung ΔT der Wand durch die Steigerung der Wärmestromdichte \dot{q} auf und führt an definierten Keimstellen der Heizfläche zur Bildung von Blasen. Erreichen die Blasen eine Größe, die aufgrund ihrer Auftriebskräfte zur Ablösung von der Heizfläche führt, steigt die Blase auf und verursacht Strömungs- und Mischungsvorgänge, die den Wärmeübergang α_{verd} erhöhen. Mit einer weiteren Steigerung der Wandtemperatur werden zunehmend mehr Keimstellen für die Blasenbildung aktiv und die Anzahl sich ablösender Blasen pro Zeiteinheit steigt an. Die Durchmischung der Flüssigkeit nahe der Heizfläche nimmt weiter zu und führt zu einem intensiven Wärmeübergang und einer hohen Wärmestromdichte. Letztere weist einen maximal erreichbaren Wert auf, der für einige technische Anlagen in Bezug auf die Betriebssicherheit von Bedeutung ist, da eine zusätzliche Erhöhung der Wandtemperatur zu einer sinkenden Wärmestromdichte und einem instabilen Betriebspunkt führt. Die Ursache und Folge dieses Verhaltens wird im folgenden Abschnitt erklärt.

Zunächst soll jedoch ein theoretischer Hintergrund zum Blasensieden gegeben werden, in dem einige relevante Mechanismen der Blasenbildung im Detail veranschaulicht werden. Diese sind vor allem in Bezug auf die Auswahl der Oberflächengeometrie von großer Bedeutung und sind Grundlage für die Entwicklung neuer Oberflächenstrukturen.

Die Entstehung von Dampfblasen geschieht, wie bereits erwähnt, an Keimstellen. Diese Orte zeichnen sich z.B. durch Partikel aus oder dass keine vollständige Benetzung der Flüssigkeit an der Oberfläche der Heizfläche vorliegt. Winzige Dampf- oder Gasreste werden eingeschlossen, die Ursprung von Dampfblasen sein können. Man spricht von heterogener Keimbildung. Daneben existiert die homo-

gene Keimbildung, die vom Siedeverzug bei Flüssigkeiten her bekannt ist. Sie tritt oft in sehr reinen, gas- und partikelfreien Flüssigkeiten und in Verbindung mit glatten, sauberen Behälteroberflächen auf. Bei der homogenen Keimbildung kann eine Flüssigkeit durch fehlende Nukleationskeime deutlich über ihre Sättigungstemperatur erhitzt werden, ohne dass sich Dampfblasen bilden. Da dieser Zustand metastabil ist, kann bspw. durch eine Erschütterung eine schlagartige Bildung von Dampfblasen ausgelöst werden, die unter Umständen zu einem explosionsartigen Entweichen des Dampfes führt. In industriellen Anwendungen trifft man hingegen selten den Fall von derart reinen Flüssigkeiten und Behältern an. Die heterogene Keimbildung ist daher von überwiegender Relevanz.

Für den theoretischen Hintergrund der Blasenentstehung und des Blasenwachstums nehmen wir zunächst eine kugelförmige Gas- oder Dampfblase mit dem Radius r an, die sich in einer ruhenden Flüssigkeit mit dem Druck p_l befindet, wie in Abb. 2.2 skizziert. Bei differentieller Betrachtung der Oberfläche der Blase und unter der Annahme, dass sich die Blase (Index v) und die Flüssigkeit (Index l) in thermischem Gleichgewicht

$$\vartheta_v = \vartheta_l \quad (2.4)$$

befinden, gilt für das mechanische Gleichgewicht aus der temperaturabhängigen Oberflächenspannung σ an der Phasengrenzfläche und einer resultierenden Kraft F_R

$$d^2 F_R = 2\sigma r d\varphi^2. \quad (2.5)$$

Auf das Oberflächenelement wirkt zudem der Flüssigkeitsdruck p_l und der entgegengesetzte Dampfdruck p_v . Gl. 2.5 erweitert sich somit zu

$$p_l(rd\varphi)^2 + d^2 F_R = p_v(rd\varphi)^2. \quad (2.6)$$

Aus diesem Kräftegleichgewicht folgt die Young-Laplace-Gleichung

$$p_v = p_l + \frac{2\sigma}{r} \quad (2.7)$$

und somit die Erkenntnis, dass der Druck im Inneren der Blase um den Term $2\sigma/r$ größer ist als der Druck in der flüssigen Phase. Es erschließt sich, dass die Existenz von Blasen eine ausreichende Überhitzung der Flüssigkeit voraussetzt, da für den Druck im Inneren der Blase eine differenzierte Sättigungstemperatur gültig ist. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, kondensiert eine existierende Dampfblase auf-

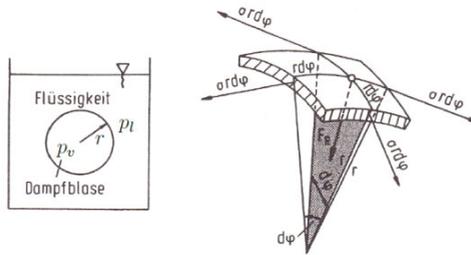


Abb. 2.2: Kräftegleichgewicht an einer kugelförmigen Blase in einer Flüssigkeit [2]

grund ihres Zustands unterhalb der lokalen Sättigungsbedingungen. Der kritische Dampfblasenradius, der zum Überleben einer Blase notwendig ist, lässt sich nach Baehr und Stephan [2] mit

$$r_{krit} \approx \frac{2\sigma T_s}{\rho'' \Delta h_{verd} \Delta \vartheta} \quad (2.8)$$

ermitteln. Mit steigendem Sättigungsdruck bzw. Sättigungstemperatur nimmt der kritische Radius ab, da die Oberflächenspannung mit zunehmender Temperatur sinkt. Somit sind bei höheren Sättigungsdrücken mehr Keimstellen an der Blasenbildung aktiv beteiligt. Um die Dampfblasenbildung zu initiieren, ist eine Überhitzung notwendig. Diese ist jedoch zu Beginn der Blasenentstehung, aufgrund sehr kleiner Radien r , nach Gl. 2.7 vergleichsweise groß. Mit steigendem Blasendurchmesser und konstanten Sättigungsbedingungen kann die Blase anwachsen, bis sie sich durch Auftriebskräfte von ihrer Keimstelle losreißt. Da im Allgemeinen eine niedrige Überhitzung der Flüssigkeit anzustreben ist, folgt aus den genannten Erkenntnissen, dass eine beheizte Oberfläche vor allem zwei Kriterien aufweisen sollte:

1. Hohe Keimstellendichte

Die Oberfläche ist mit möglichst vielen Keimstellen auszuführen, sodass die Entstehung von Dampfblasen potenziell an vielen Orten möglich ist. Kurihari und Myers [53] und Corty und Foust [18] untersuchten den Einfluss der Anzahl der Keimstellen und der Oberflächenrauheit auf den Wärmeübergang und stellten eine Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten gemäß Gl. 2.9 fest.

$$\alpha_{verd} \propto (N/A)^{0,43} \quad (2.9)$$

N bezeichnet hierbei die Anzahl der Keimstellen und A steht stellvertretend für die untersuchte Fläche. Nach Gl. 2.9 führt eine hohe Keimstellendichte bereits bei geringerer Überhitzung der Heizwand zu einem erhöhten Aufkommen an Blasen und damit zu einer effektiveren Durchmischung der Flüssigkeit und zu einem gesteigerten Wärmeübergangskoeffizienten α_{verd} . Die maximale Wärmestromdichte \dot{q}_{max} ist zudem bereits bei geringeren Temperaturdifferenzen ΔT erreichbar.

Die Ausführung der Heizfläche mit vielen Keimstellen wird erst seit den letzten Jahrzehnten durch das zunehmende Wissen über die Verdampfungsmechanismen und verbesserte Fertigungsmethoden intensiv durch verschiedenste Formen der Oberflächenbearbeitung oder -beschichtung an Rohren realisiert. Im Folgenden wird hierbei zwischen porösen Metallschichten und integral gefertigten Oberflächen unterschieden, da diese die gebräuchlichsten Methoden darstellen.

Als einer der ersten erkannte Milton [61] die Möglichkeit, die Anzahl der Keimstellen durch Aufbringen einer gesinterten, porösen Metallschicht zu erhöhen. Abb. 2.3 zeigt hierzu das Verhalten von Flüssigkeit und Dampf in einer idealisierten porösen Oberfläche. Durch Verbesserungen dieser Metallschicht, die unter dem Namen "High Flux" bekannt wurde, konnte Milton [61] bspw. eine mehr als 20-fache Steigerung des Wärmeübergangs gegenüber glatten Rohren beim Verdampfen von flüssigem Sauerstoff erzielen. Für weitere Stoffe, die von technischem Interesse sind, konnten ebenfalls Verbesserungen um den Faktor 10 beobachtet werden.

Eine weitere Möglichkeit den Wärmeübergang an Rohroberflächen zu verbessern, ist die Anwendung von integral gefertigten Rippengeometrien, initiiert durch Arbeiten von Zieman und Katz [96], Robinson und Katz [71], Myers und Katz [65] und Katz et al. [45].

Das Wissen über die Beeinflussung des Wärmeübergangs durch die Anzahl der Keimstellen war zum Zeitpunkt dieser Arbeiten jedoch noch nicht fundiert. Daher war zunächst die Leistungssteigerung allein durch Oberflächenvergrößerung beabsichtigt. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Berippung den Siedeprozess begünstigt und eine höhere Leistungssteigerung möglich war, als durch die Oberflächenvergrößerung erwartet wurde. Für Verdampfungszwecke wird im Allgemeinen die Rippenhöhe vergleichsweise niedrig gewählt, da die Effizienz der Rippe bei mittelhohen oder hohen Rippen stark abnimmt.

Grundsätzlich ist der Wärmeübergang an Rippenrohr nach Fath und Gorenflo [22] [21] [30] sehr stark abhängig von dem verwendeten Stoff bzw. dessen Oberflächenspannung σ , dem reduzierten Druck p^* , der Wärmestromdichte \dot{q} und dem

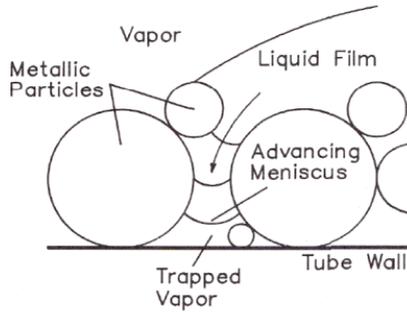


Abb. 2.3: Idealisierte Oberfläche einer porösen Metallschicht [86]

Abstand zwischen den Rippen. Im Allgemeinen wird für Stoffe mit geringen Oberflächenspannungen eine Rohroberfläche mit höherer Rippendichte empfohlen und dementsprechend eine geringe Rippendichte für Stoffe mit hohen Oberflächenspannungen [86].

2. Optimierte Geometrie der Keimstelle

Durch die Entwicklung fertigungstechnischer Verfahren kann auch die geometrische Optimierung der Keimstellen einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungscharakteristik der Heizoberfläche haben. Aus Gl. 2.7 ist bekannt, dass mit steigender Wandtemperatur immer mehr Keimstellen aktiv zur Blasenbildung beitragen, da die nötige Überhitzung auch zunehmend für Keimstellen ausreichend ist, an denen kleinere Blasen entstehen. Ziel ist es demnach Keimstellen so auszulegen, dass die Entstehung und das Wachstum einer Dampfblase begünstigt werden.

Die Steigerung des Wärmeübergangs durch verbesserte Oberflächenstrukturen ist derzeit aktuelles Forschungsthema und wurde in der Vergangenheit bereits in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht. Die Ausführung der Keimstelle auf der Rohroberfläche in Form von Kavitäten wurde erstmals von Griffith und Wallis [32] experimentell untersucht. Sie stellten fest, dass der Öffnungsdurchmesser der Kavität den Blasenradius und somit die nötige Überhitzung der Wand beeinflusst. Zudem vermuteten sie, dass eine Kavität, wie sie in Abb. 2.4 zu erkennen ist, zu einer stabileren Blasenbildung führen würde, da für konkave Ausbildungen der Grenzfläche zwischen Dampf und Flüssigkeit negative Überhitzungswerte auftreten würden.

Blasenwachstum würde daher bis zum Erreichen einer konvexen Grenzfläche bereits unterhalb der Sättigungstemperatur vorliegen bis erneut ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Darüber hinaus erwiesen sich Kavitäten als optimale

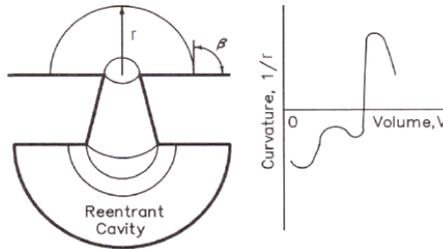


Abb. 2.4: Grenzfläche zwischen Dampf und Flüssigkeit und dessen Krümmung innerhalb und außerhalb einer Kavität [86]

Möglichkeit Gase oder Dämpfe einzuschließen, um die Grundlage für das Wachstum der Blasen zu ermöglichen. Untersuchungen von Bankoff [3] zeigen, dass die Ausbreitung einer flüssigen Phase über eine raue Oberfläche zum Einschließen von Gasen führen kann, wenn der Randwinkel der Flüssigkeit β größer als der Winkel einer Kavität θ oder Kerbe ist.

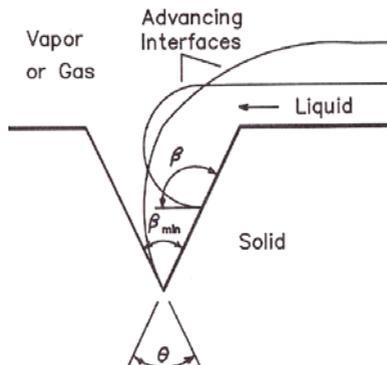


Abb. 2.5: Ausbreitung eines Flüssigkeitsfilmes über eine mit Gas oder Dampf gefüllte Kerbe [86]

Aus der Zielsetzung möglichst viele Keimstellen mit möglichst optimaler Geometrie auf der Rohroberfläche aufzubringen folgten verschiedene Ansätze zur Um-

setzung, die jeweils auf verschiedenen Fertigungstechnologien basierten. Abb. 2.6 zeigt hierzu einige Beispiele zur Realisierung von Kavitäten, deren Geometrie entscheidenden Einfluss auf die Leistungscharakteristik des Rohres hat. Daneben ist die Dichte dieser Kavitäten bzw. die Rippendichte (f_{pi} = fins per inch) von Bedeutung und wird oftmals als Referenz verwendet.

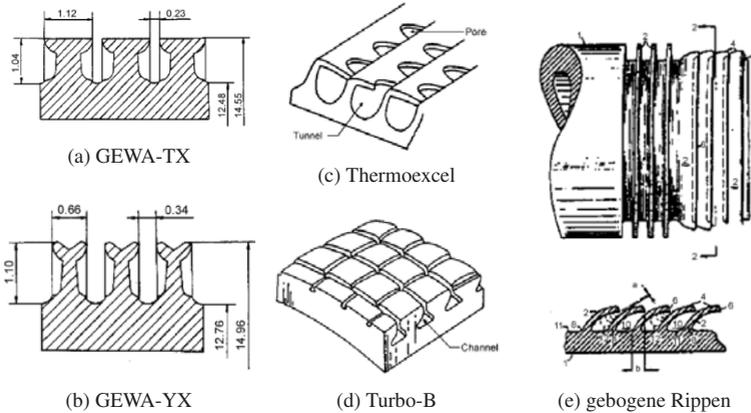


Abb. 2.6: Beispielhafte Ausführung zur Realisierung von Kavitäten auf Rohroberflächen [14] [92] [93]

2.1.3 Filmsieden

Wird über den Punkt der maximalen Wärmestromdichte eine Erhöhung der Wandtemperatur erzwungen, kommt es vermehrt zu Wechselwirkungen der Blasen im wandnahen Bereich. Die intensive Dampfbildung führt zu koalierenden Blasen, die die Heizwandoberfläche zunehmend mit einem isolierenden Dampffilm überziehen. Aus der vergleichsweise niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Dampfes folgt mit Ausweitung des Dampffilms ein rapide abnehmender Wärmeübergang bzw. eine abnehmende Wärmestromdichte. Ist die Heizwand nur teilweise von einem Dampffilm bedeckt, spricht man von partiellem Filmsieden. Vollständiges Filmsieden wird demnach bei vollständiger Benetzung der Heizwand mit einem Dampffilm erreicht. Der Wert der Wärmestromdichte nimmt am sogenannten Leidenfrostpunkt ein lokales Minimum an. Höhere Wärmestromdichten sind ausgehend von diesem Punkt

<http://www.springer.com/978-3-658-09529-1>

Kondensation und Verdampfung an strukturierten Rohren
Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung von
Wärmeübergangskoeffizienten

Steinhoff, R.

2015, XVI, 81 S. 33 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-09529-1