

LESEPROBE • MASTERARBEIT

Kapitel 2.3

Thermodynamik und Wärmeübertragung

Numerische Strömungssimulation der
Verdampfung von CO₂ in einem vertikalen Rohr mit
Ansys® Fluent®

Kevin Nekkah

Masterstudiengang Produktentwicklung und Simulation

Fachhochschule Dortmund, 2023

Auszug aus der Originalarbeit, Seiten 20 bis 32

www.kevinnekkah.com

2.3 Thermodynamik und Wärmeübertragung

In vielen Bereichen der Technik, wie etwa bei der Kühlung von Turbinenschaufeln, der Motor-kühlung, der Raumheizung oder wie in dieser Arbeit bei der Dampferzeugung, spielt die klas-sische Thermodynamik eine übergeordnete Rolle. Sie kann beispielsweise die Frage beantwor-ten, wie viel Wärmeenergie benötigt wird, um ein bestimmtes Fluid zu verdampfen. Jedoch be-rücksichtigt sie nicht alle physikalischen Gesetze, die den Wärmetransport beeinflussen. Um ein tieferes Verständnis hierfür zu erlangen, ist daher eine zusätzliche Betrachtung der Wär-meübertragung erforderlich. In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen der ineinandergreifenden Thermodynamik und Wärmeübertragung sowie die einschlägige Litera-tur behandelt.

2.3.1 Wärmetransportmechanismen

Es werden drei grundlegende Transportmechanismen unterschieden:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlung

Eine gängige Einteilung unterscheidet zwischen stoffgebundenen und stoffungebundenen Me-CHANISMEN. Während Wärmeleitung und Konvektion stoffgebunden sind, ist Strahlung stoffun-gebunden. Das bedeutet, dass der Energieaustausch durch Wärmestrahlung optimal ist, wenn der Raum zwischen den beiden Körpern frei von Materie ist, d. h. wenn sich beide Körper im Vakuum befinden.

In Abbildung 2-12 ist eine mögliche Einteilung der verschiedenen Wärmetransportmechani-smen dargestellt.

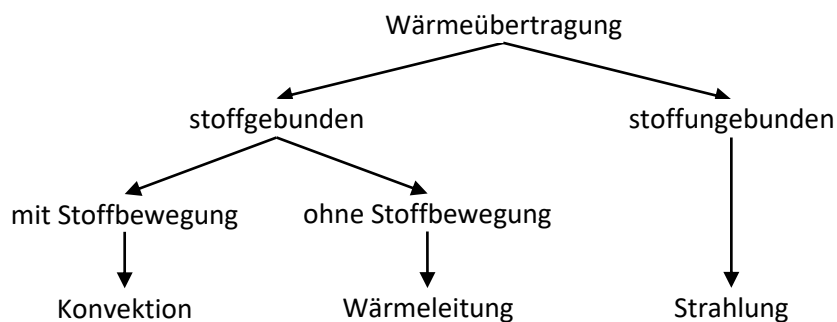


Abbildung 2-12 Mögliche Einteilung der verschiedenen Wärmetransportmechanismen, überarbeitete Darstellung nach [10] (S. 2)

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass die Energieübertragung bei Wärmeleitung und Konvektion ausschließlich in Richtung abnehmender Temperatur erfolgt. Bei der Strahlung hingegen kann der Austausch von Wärmeenergie in beide Richtungen erfolgen, wobei der Net-wärmestrom von höherer zu niedrigerer Temperatur fließt.

Bei der Wärmeleitung wird Energie aufgrund eines Temperaturgefälles zwischen unmittelbar benachbarten Teilchen übertragen. Dieser Prozess findet z. B. in Festkörpern oder in ruhenden Fluiden statt. Dabei ändern sich die Positionen der Masseteilchen nur mikroskopisch durch Gitterschwingungen oder freie Elektronen. Ein gutes Beispiel für Wärmeleitung ist der Wärmetransport durch eine Hauswand. Der resultierende Wärmestrom durch Wärmeleitung kann mit der Gleichung

$$\dot{Q}_\lambda = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta T_{12} \quad (2.67)$$

berechnet werden.

Unter thermischer Konvektion versteht man den Transport von Wärmeenergie durch strömende Fluide. Sie ist immer mit einer inneren Bewegung des Fluids und damit mit einem Massentransport verbunden. Wie in Abbildung 2-13 dargestellt, gibt es zwei Arten der Konvektion: die freie Konvektion und die erzwungene Konvektion.

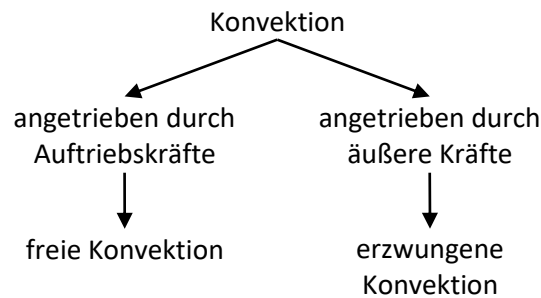


Abbildung 2-13 Einteilung von freier und erzwungener Konvektion, überarbeitete Darstellung nach [10] (S. 2)

Bei der freien Konvektion wird die Strömung durch Auftriebskräfte aufgrund von Dichteunterschieden angetrieben. Die erzwungene Konvektion wird dagegen durch äußere Kräfte, wie z. B. einen Ventilator oder den Wind, angetrieben. Der konvektive Wärmestrom ist definiert als

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha \cdot A \cdot \Delta T_{12}. \quad (2.68)$$

Wärmestrahlung ist ein Wärmeaustausch durch elektromagnetische Strahlung im Bereich von ca. 0,1 bis 1000 μm . Dabei findet ein Wärmetransport zwischen zwei Körpern durch Photonen statt. Mit Ausnahme einiger diathermer Medien (wärmedurchlässige Gase) emittieren alle Körper Wärmestrahlung. Der Wärmestrom durch Wärmestrahlung kann durch die Gleichung

$$\dot{Q}_\varepsilon = C_{12} \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4). \quad (2.69)$$

ausgedrückt werden. Der Strahlungsaustauschkoeffizient hängt wiederum von der Stefan-Boltzmann-Konstante, den Oberflächengrößen der beteiligten Körper und deren Emissionsgraden ab. Er kann mathematisch durch die Gleichung

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left\{ \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right\} \cdot \frac{A_1}{A_2}} \quad (2.70)$$

beschrieben werden.

Abbildung 2-14 zeigt die Berechnung des Wärmedurchgangs als Kombination von Wärmeübergang, Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Zusätzlich ist ein möglicher resultierender Temperaturverlauf dargestellt. Es gilt

$$\dot{Q}_\alpha = \dot{Q}_\lambda = \dot{Q}_\varepsilon = \dot{Q}. \quad (2.71)$$

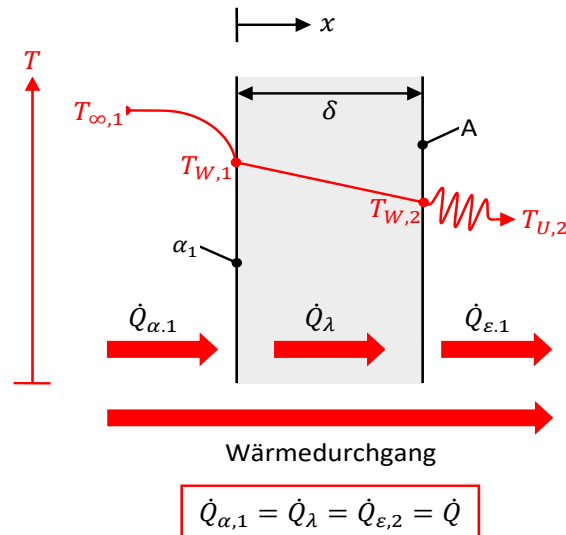


Abbildung 2-14 Wärmedurchgang als Kombination von Wärmeübergang, Wärmeleitung und Wärmestrahlung, überarbeitete Darstellung nach [11] (S. 1-11)

[10], [11] (Kap. 1)

2.3.2 Péclet-Gleichung

In der vorliegenden Arbeit wird flüssiges Kohlendioxid in einer vertikalen Rohrströmung verdampft, wobei Wärmeleitung durch die Rohrwand und erzwungene Konvektion zwischen Wand und Fluid die dominierenden Wärmetransportmechanismen darstellen. Zur Beschreibung des Wärmestroms kann die Péclet-Gleichung verwendet werden. Für einen Zylinder mit n Schichten lautet die Péclet-Gleichung

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l \cdot \Delta T_{\infty,ia}}{\frac{1}{\alpha_i \cdot r_1} + \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \left\{ \frac{r_{j+1}}{r_j} \right\} \right] + \frac{1}{\alpha_a \cdot r_{n+1}}}. \quad (2.72)$$

Betrachtet man den Wärmestrom von der äußeren Mantelfläche des Rohres aus, so kann die Gleichung für einen einfachen Zylinder zu

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l \cdot \Delta T}{\frac{1}{\alpha_i \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ \frac{r_2}{r_1} \right\}} \quad (2.73)$$

vereinfacht werden.

Abbildung 2-15 visualisiert den vorhandenen Wärmestrom und den Temperaturverlauf in radialer Richtung.

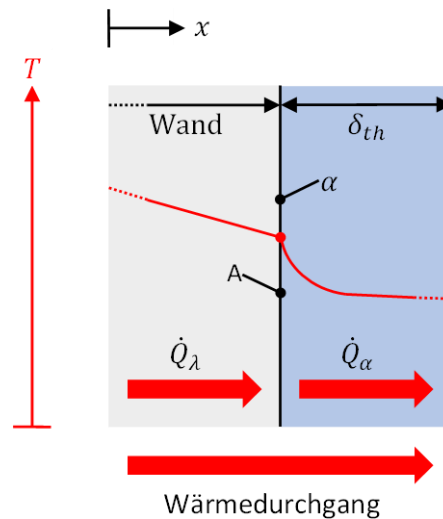


Abbildung 2-15 Wärmestrom und Temperaturverlauf in radialer Richtung in der Rohrströmung, überarbeitete Darstellung nach [11] (S. 1-11)

[11] (Kap. 1)

2.3.3 Verdampfung

Die Verdampfung ist der Prozess, bei dem ein Fluid vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht. Dabei wird dem Fluid so lange Energie zugeführt, bis die Bewegungen der im Fluid enthaltenen Teilchen so groß werden, dass die Bindungen zwischen ihnen vollständig gelöst werden. Der Aggregatzustand hängt stark von den Zustandsgrößen ab, wie das $\log(p)$ - t -Diagramm in Abbildung 2-16 zeigt. Neben den drei verschiedenen Phasenbereichen ist zu erkennen, dass bei unterschiedlichen Drücken verschiedene Aggregatzustände eingenommen werden. Daraus kann geschlossen werden, dass die Verdampfung nicht ausschließlich durch Wärmezufuhr erfolgen muss. Ein typisches Beispiel aus der Technik ist die Kavitation. Abbildung 2-17 zeigt die drei Aggregatzustände anhand eines Teilchenmodells. Im Festkörper nehmen die Teilchen feste Plätze zueinander ein und liegen sehr dicht beieinander. Sie bewegen sich nur geringfügig in Form von Schwingungen. In der Flüssigkeit haben die Teilchen keine festen Plätze mehr und sind untereinander beweglich, es besteht aber noch eine Bindung zwischen ihnen. Im Gas sind die Teilchen frei beweglich, ihre Abstände zueinander sind sehr groß¹.

¹ Gitterfehler im Festkörper werden in dieser Darstellung der Einfachheit halber nicht weiter berücksichtigt. Die unterschiedlichen Teilchenzahlen in den einzelnen Phasen sind in der Abbildung darstellungsbedingt.

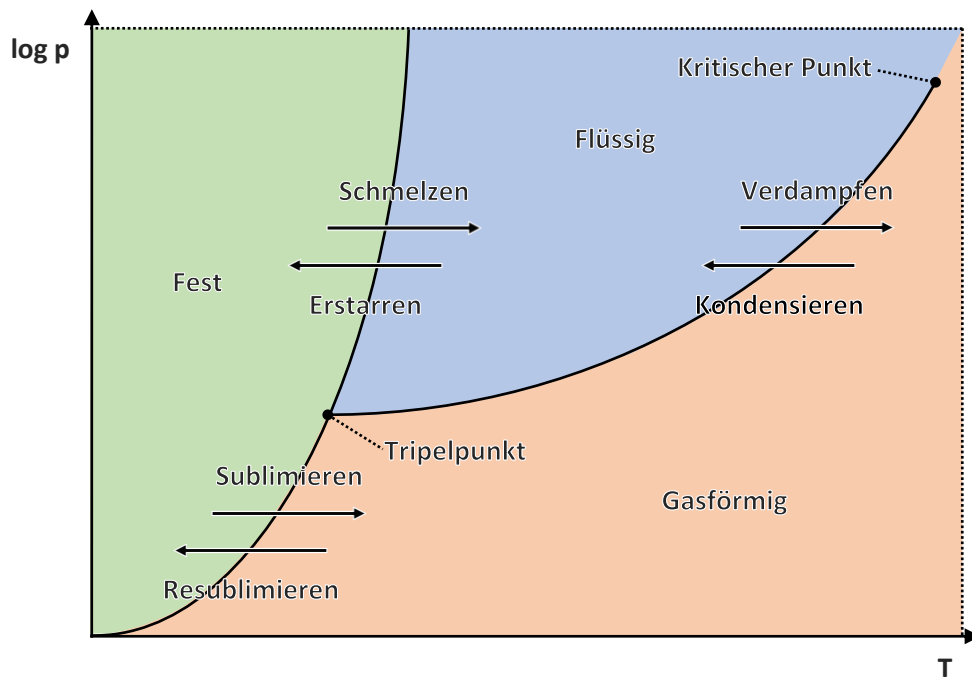


Abbildung 2-16 $\log(p)$ - T -Diagramm, überarbeitete Darstellung nach [12]

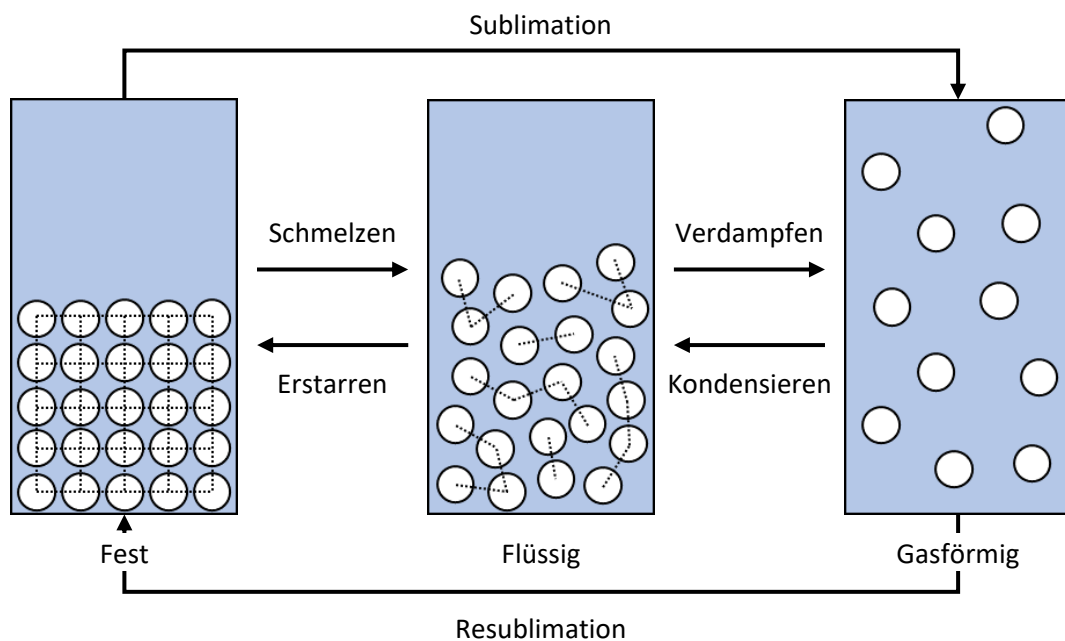


Abbildung 2-17 Darstellung der drei klassischen Aggregatzustände mit Hilfe eines Teilchenmodells, überarbeitete Darstellung nach [13]

[12], [13]

2.3.4 Erforderliche Wärmestromdichte

Um die für den Prozess erforderliche Wärmestromdichte zu bestimmen, muss zunächst die für die Verdampfung einer Flüssigkeit erforderliche Wärmeenergie ermittelt werden. Dazu wird der Hauptsatz aufgestellt und nach der Wärmeenergie aufgelöst. Hieraus folgt

$$Q = \Delta H_v, \quad (2.74)$$

sodass die Verdampfungsenthalpie der Wärmeenergie entspricht, die einer bestimmten Flüssigkeitsmenge zugeführt werden muss, um sie bei konstanter Temperatur in den gasförmigen Zustand zu überführen. Um den erforderlichen Wärmestrom zu bestimmen, muss die thermische Energie über die Zeit differenziert werden. Dies führt zu

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h_v. \quad (2.75)$$

Setzt man den Wärmestrom in Beziehung zur wärmeübertragenden Fläche $A_{\dot{Q}}$, so erhält man die Wärmestromdichte

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A_{\dot{Q}}} \quad (2.76)$$

$$= \frac{\dot{m}}{A_{\dot{Q}}} \cdot \Delta h_v. \quad (2.77)$$

Mit der Massenstromdichte

$$m^* = \frac{\dot{m}}{A_{\dot{m}}} \quad (2.78)$$

kann die Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Massenstromdichte sowie von der masseudurchströmten Fläche $A_{\dot{m}}$ ausgedrückt werden. Man erhält dann die für den Prozess erforderliche Wärmestromdichte

$$\dot{q} = m^* \cdot \frac{A_{\dot{m}}}{A_{\dot{Q}}} \cdot \Delta h_v. \quad (2.79)$$

[9] (Kap. D1)

2.3.5 Kritische Wärmestromdichte

Je nach Höhe der Wärmestromdichte ergeben sich unterschiedliche Siedebereiche. Man unterscheidet zwischen:

- stillem Sieden,
- Blasensieden,
- Übergangssieden (instabiler Bereich) und
- Filmsieden.

Das Blasensieden ist von großer technischer Bedeutung, da es hohe Wärmestromdichten bei geringen Temperaturdifferenzen ermöglicht. Bei weiterer Temperaturerhöhung kommt es zum Übergangssieden, bei dem die Blasen so schnell wachsen, dass die Heizfläche teilweise mit einem instabilen Dampffilm bedeckt ist, was die Wärmeleitfähigkeit verringert. Dies kann zum sog. Burnout führen, bei dem die Heizfläche austrocknet und sehr hohe Temperaturen erreicht, was wiederum zum Materialversagen führen kann.

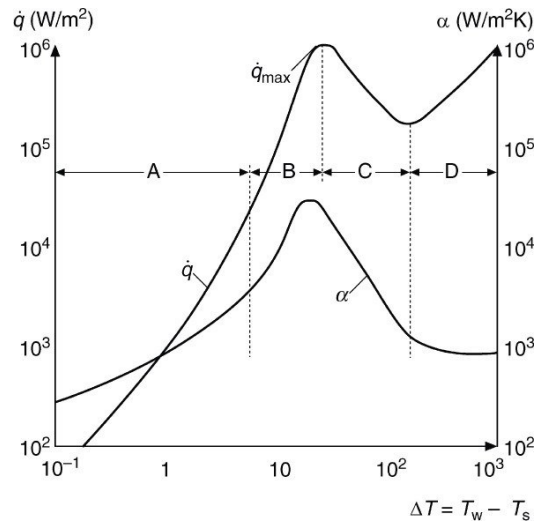


Abbildung 2-18 Nukiyama-Kurve für Behältersieden (Wasser bei 1 bar) mit den verschiedenen Siedebereichen: A – stilles Sieden, B – Blasensieden, C – instabiler Bereich, D – Filmsieden [9] (S. 30)

In Abbildung 2-18 ist die Nukiyama-Kurve dargestellt. Sie zeigt am Beispiel von Behältersieden von Wasser bei 1 bar die verschiedenen Siedebereiche in Abhängigkeit von Wärmestromdichte und Temperatur.

Nach Zuber ist die Wärmestromdichte für eine horizontale Fläche, ab der Übergangssieden zu erwarten ist,

$$\dot{q}_{krit,Zuber} = 0,131 \cdot \rho_g^{1/2} \cdot \Delta h_v \cdot \{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)\}^{1/4}. \quad (2.80)$$

Nach Vishnevs Korrelation ist das Verhältnis der kritischen Wärmestromdichten für horizontale und geneigte Flächen

$$\frac{\dot{q}_{krit}}{\dot{q}_{krit,Zuber}} = \frac{(190^\circ - \theta)^{1/2}}{190^{0.5}} \quad (2.81)$$

$$= \left\{ \frac{190^\circ - \theta}{190^\circ} \right\}^{1/2}. \quad (2.82)$$

Umgestellt nach der kritischen Wärmestromdichte für geneigte Flächen ergibt sich

$$\dot{q}_{krit} = \dot{q}_{krit,Zuber} \cdot \left\{ \frac{190^\circ - \theta}{190^\circ} \right\}^{1/2} \quad (2.83)$$

und mit der kritischen Wärmestromdichte nach Zuber eingesetzt

$$\dot{q}_{krit} = 0,131 \cdot \rho_g^{1/2} \cdot \Delta h_v \cdot \{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)\}^{1/4} \cdot \left\{ \frac{190^\circ - \theta}{190^\circ} \right\}^{1/2}. \quad (2.84)$$

[9] (Kap. B2), [14], [15]

2.3.6 Zustandswerte berechnen

Je nachdem, ob sich das Fluid im Flüssigkeits-, Dampf- oder Nassdampfbereich befindet, werden die Zustandswerte des Fluids entweder berechnet oder mit Hilfe geeigneter

Nachschlagewerke ermittelt. Sowohl für den Flüssigkeits- als auch für den Dampfbereich wird in der Regel eine Stoffdatentabelle verwendet. Je nach betrachtetem Prozess werden zunächst geeignete Zustandsgrößen ausgewählt und anschließend mit Hilfe der Tabelle bestimmt.

Die Verdampfung von Wasser aus dem unterkühlten Flüssigkeitsbereich in den überhitzten Dampfbereich bei Umgebungsdruck ist z. B. ein isobarer Prozess, bei dem der Druck konstant ist. Mit diesem Druck und der Anfangs- und Endtemperatur können die Zustandswerte des Wassers zu Beginn und des Dampfes am Ende des Prozesses aus den entsprechenden Stoffdatentabellen entnommen werden.

Befindet sich das Fluid im Nassdampfbereich, können die Zustandswerte mit Hilfe einer Stoffdatentabelle berechnet werden, die die Sättigungszustände enthält.

Im Allgemeinen gilt

$$z_x = z' + x \cdot (z'' - z') \quad (2.85)$$

Dabei ist z' eine spezifische Größe auf der Siedelinie, z'' eine Größe auf der Taulinie und x der Dampfgehalt des Fluids. Daraus lassen sich die Gleichungen für die Zustandsgrößen des Fluids

$$v_x = v' + x \cdot (v'' - v'), \quad (2.86)$$

$$h_x = h' + x \cdot (h'' - h'), \quad (2.87)$$

$$s_x = s' + x \cdot (s'' - s') \quad (2.88)$$

usw. ableiten. [5] (Kap. 7)

2.3.7 Blasenbildung infolge freier Konvektion

Für die Blasenbildung in einer reinen Flüssigkeit sind Siedekeime erforderlich. Sind diese vorhanden, so wachsen aus ihnen bei ausreichender Wandüberhitzung einzelne Dampfblasen, die sich, sobald die Auftriebskräfte die Adhäsionskräfte übersteigen, von der Wand lösen und in die Flüssigkeit aufsteigen. Die aufsteigende Dampfblase gibt Wärme an ihre Umgebung ab. Dabei kommt es zu Turbulenzen und erneuter Keimbildung. Dieser Vorgang wiederholt sich mit unterschiedlicher zeitlicher Häufigkeit, so dass der Ort der Siedekeimbildung als „Produktionsstätte“ der Dampfblasen angesehen werden kann.

Abbildung 2-19 zeigt charakteristische Stellen für die Bildung von potenziellen Siedekeimen. In Abbildung 2-20 ist der zeitliche Ablauf der Bildung von Dampfblasen infolge freier Konvektion in mehreren Stufen dargestellt.

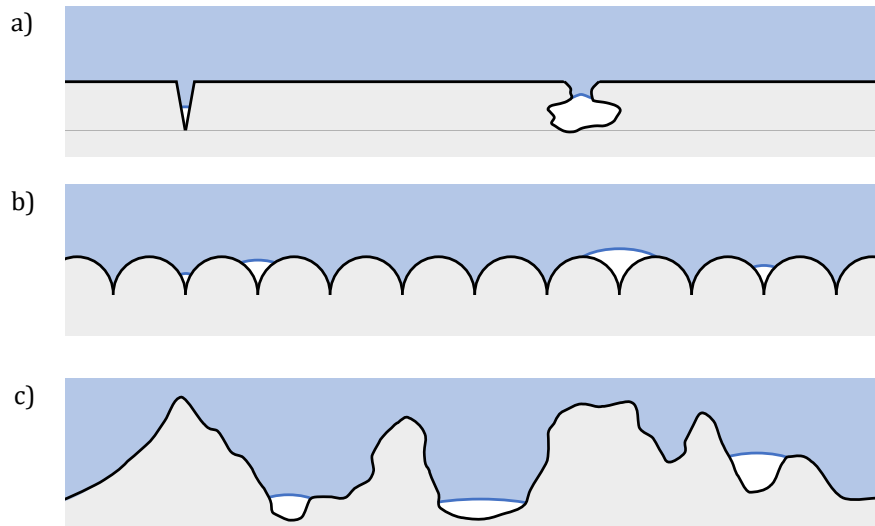


Abbildung 2-19 Siedekeime in einer nicht vollständig entgasten Flüssigkeit an a) einem Kratzer (links) und einer Pore in einer geschliffenen Oberfläche (rechts), b) einer polierten Oberfläche und c) einer porösen Oberfläche, überarbeitete Darstellung nach [16] (S. 632)

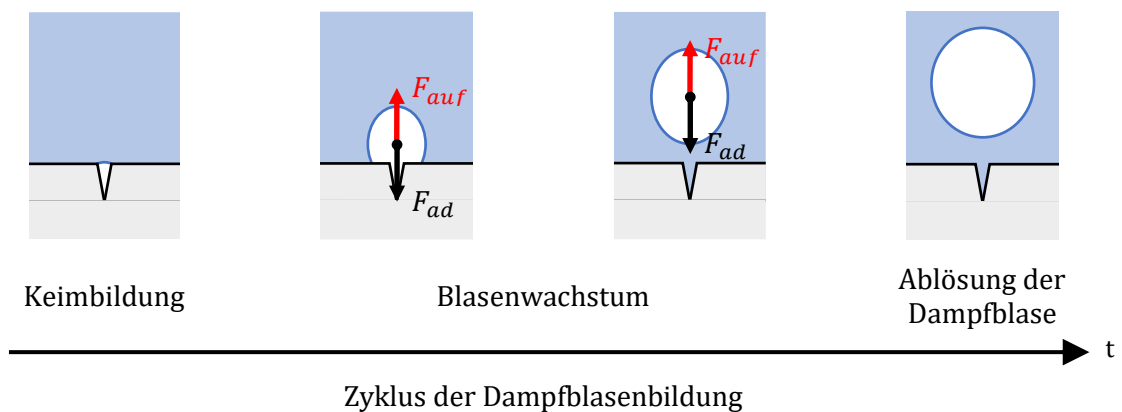


Abbildung 2-20 Entstehung einer Dampfblase durch freie Konvektion, überarbeitete Darstellung nach [17]

Ohne Siedekeime, d. h. bei vollständig entgasten Flüssigkeiten, kommt es in der Regel wegen der erforderlichen Aktivierungsenergie zunächst zu einer Siedeverzögerung und erst bei Störung der überhitzten Flüssigkeit zur schlagartigen Blasenbildung. Diese erfolgt aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen Flüssigkeit und Gas meist explosionsartig und kann je nach Dampfmenge zu erheblichen Schäden führen.

Um die Keimbildung zu fördern und den Verdampfungsprozess besser steuern zu können, werden, wenn möglich und sinnvoll, sogenannte Siedesteine eingesetzt. Dies ist z. B. bei Anlagen mit flachen Heizflächen der Fall, um Beschädigungen zu vermeiden, aber auch bei Reagenzgläsern, die materialbedingt sehr glatte Oberflächen aufweisen.

Wie in Abbildung 2-21 ersichtlich, sind Siedesteine selbst poröse, unregelmäßig geformte, inerte Körper, die aufgrund ihrer Struktur in der Lage sind, Luft in ihren Hohlräumen

einzuschließen. Dadurch stellen sie Siedekeime für die Verdampfung bereit und sorgen für eine gleichmäßige Bildung von aufsteigenden Dampfblasen.

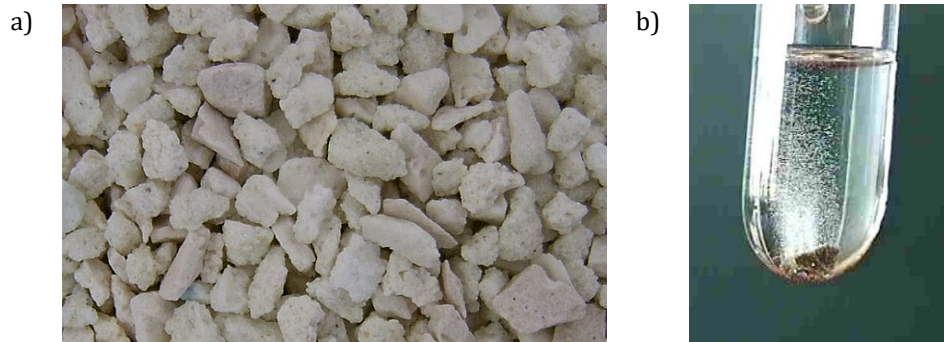


Abbildung 2-21 a) Handelsübliche Siedesteine, b) Siedesteine in einem Reagenzglas zur besseren Kontrolle des Verdampfungsprozesses und Gefahrenminimierung [18], [19]

Nach Karl Stephan vom Institut für Technische Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart berechnet sich der Radius einer Dampfblase zu

$$r \cong \frac{2 \cdot \sigma \cdot T_s}{\rho'' \cdot \Delta h_v \cdot \Delta \vartheta} \quad (2.89)$$

[9] (Kap. B2, H1), [14], [17], [18], [19], [20]

2.3.8 Blasenbildung infolge erzwungener Konvektion

Die Bildung von Dampfblasen bei erzwungener Konvektion verläuft ähnlich wie bei freier Konvektion. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, dass durch die Strömung eine bessere Durchmischung des Fluids erreicht wird und die entstehenden Blasen von der Strömung mitgerissen werden, wodurch ein starker Siedeverzug weniger wahrscheinlich ist. Die Blasen gleiten zunächst an der Rohrwand entlang und lösen sich dann von ihr ab, wie in Abbildung 2-22 dargestellt.

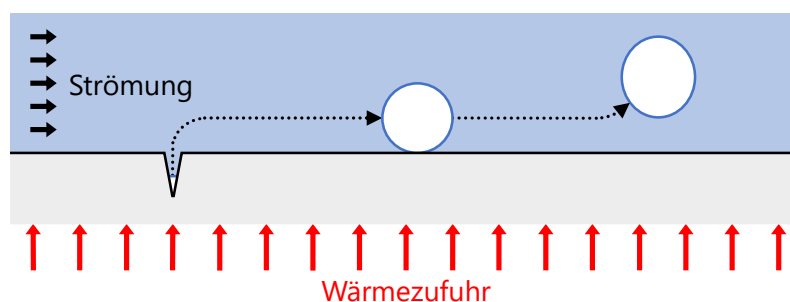


Abbildung 2-22 Entstehung einer Dampfblase durch erzwungene Konvektion, überarbeitete Darstellung nach [21]

[21]

2.3.9 Bildung von Flüssigkeitstropfen in Zweiphasenströmungen

Zu Beginn des Prozesses besteht die Rohrströmung aus einer einphasigen Flüssigkeit. Mit fortschreitendem Prozess verdampft die Flüssigkeit zunehmend und es entsteht eine zweiphasige Strömung, bis sie am Ende des Prozesses wieder einphasig, jedoch gasförmig wird. Während die Strömung zweiphasig ist, neigt der Dampfstrom dazu, sich zum Strömungskern hinzusammeln (siehe 2.3.10), was unter anderem die Bildung von Flüssigkeitstropfen begünstigt.

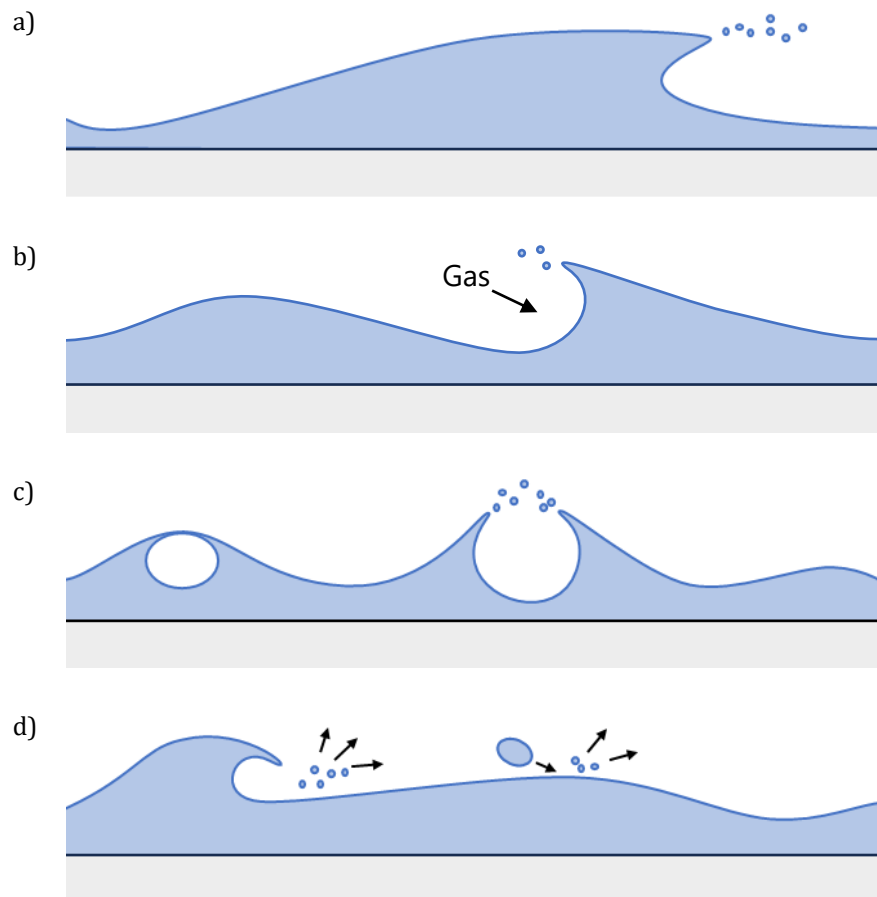


Abbildung 2-23 Bildung von Flüssigkeitstropfen in Zweiphasenströmungen a) abrollende Welle reißt ab, b) Welle wird unterschritten, c) Dampfblase zerplatzt, d) Aufprall einer Welle oder eines Tropfens auf die Flüssigkeitsoberfläche, überarbeitete Darstellung nach [22] (S. 686)

Abbildung 2-23 zeigt die verschiedenen Mechanismen, die zur Bildung von Flüssigkeitstropfen in Zweiphasenströmungen führen können:

- a) Reißen einer abrollenden Flüssigkeitswelle: Die Welle reißt an der Spitze ab; die abrollende Flüssigkeit bildet Flüssigkeitstropfen unterschiedlicher Größe.
- b) Unterschneiden der Flüssigkeit: Dampf dringt in die Welle ein, wodurch diese sich allmählich wölbt und schließlich reißt.
- c) Zerplatzen von Dampfblasen: Eine Dampfblase in der Flüssigkeit nahe der Grenzfläche platzt. Der dünne Flüssigkeitsfilm über der Dampfblase reißt und bildet mehrere Tropfen.

- d) Auftreffen einer Welle oder eines Tropfens auf die Flüssigkeitsoberfläche: Eine Welle trifft auf die Flüssigkeit und bildet Tropfen oder ein Tropfen trifft auf die Flüssigkeit und bildet kleinere Tropfen.

[22] (Kap. 14.5.20)

2.3.10 Strömungsformen

Wie bereits in Abschnitt 2.3.9 erwähnt, treten mit zunehmendem Dampfanteil einer verdampfenden Zweiphasenströmung unterschiedliche Strömungsformen auf. Beobachtet man dies entlang unbeheizter Rohrsegmente mit Hilfe von Sichtstrecken aus Glas, so unterscheidet man in aufwärts durchströmten senkrechten Rohren die in Abbildung 2-24 dargestellten Strömungsformen:

- a) Blasenströmung
- b) Kolbenblasenströmung (Pfropfenströmung)
- c) Aufgewühlte Strömung (Schaum-, Schaumringströmung)
- d) Ringströmung
- e) Ring-Strähnenströmung
- f) Nebelströmung (Sprühströmung)

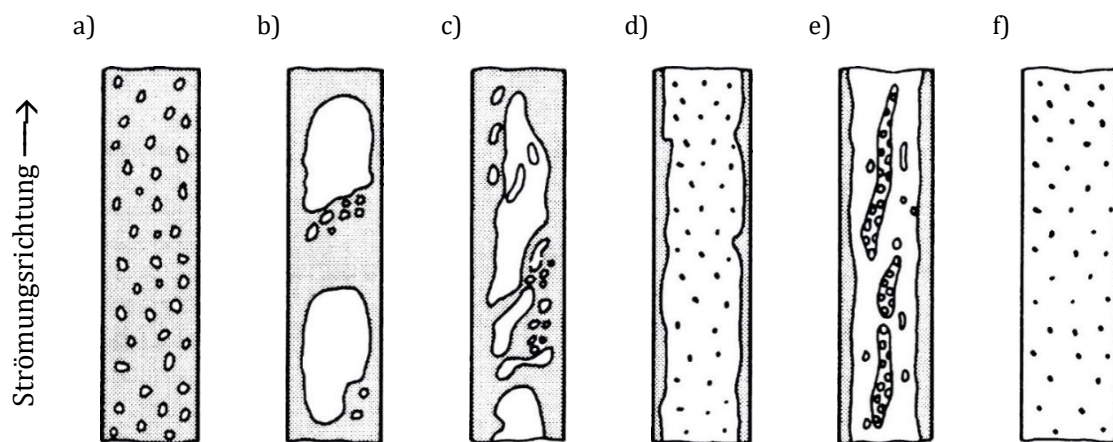


Abbildung 2-24 Strömungsformen in aufwärts durchströmten vertikalen Rohren [9] (S. 899)

Der Wärmeübergang kann ebenfalls in verschiedene Bereiche unterteilt werden. Je nach Strömungsform werden folgende Bereiche unterschieden:

- konvektiver Wärmeübergang an Flüssigkeit,
- unterkühltes Sieden,
- Blasensieden,
- Strömungssieden und
- konvektiver Wärmeübergang an den Dampf.

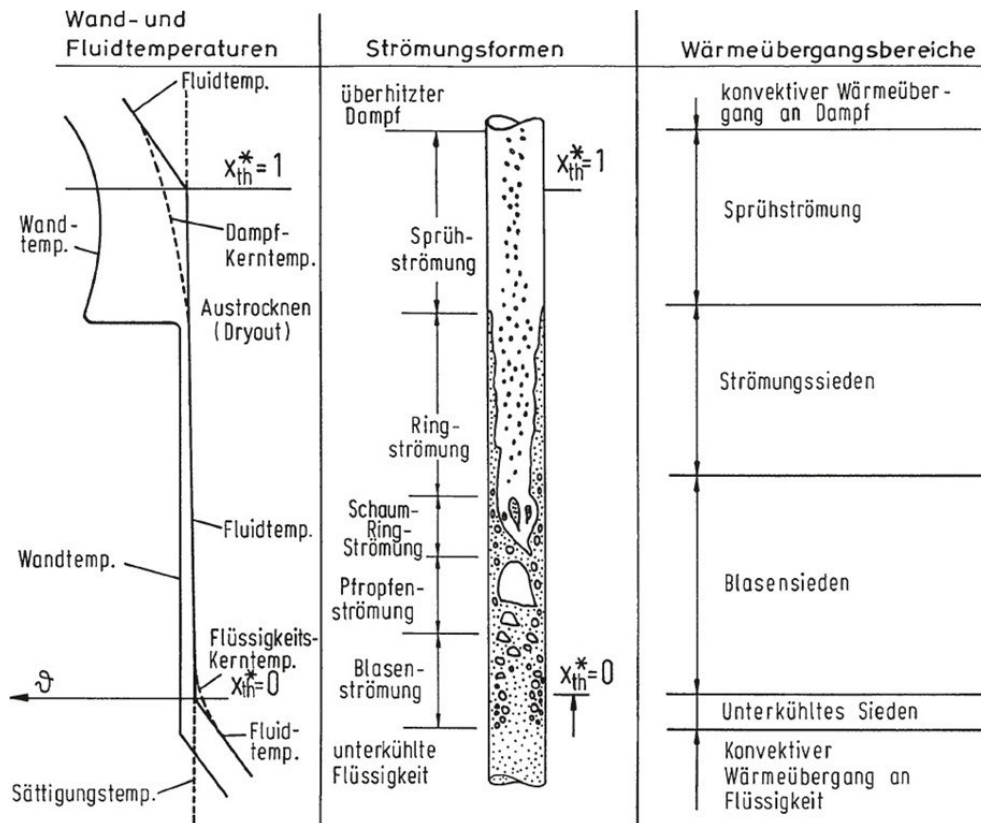


Abbildung 2-25 Verlauf der Wand- und Fluidtemperaturen in axialer Richtung sowie die sich einstellenden Strömungsformen und Wärmeübergangsbereiche einer beheizten vertikalen Rohrströmung [7] (S. 596)

Abbildung 2-25 zeigt die sich einstellenden Wärmeübergangsbereiche und Strömungsformen über die gesamte Länge einer beheizten vertikalen Rohrströmung. Zusätzlich sind die qualitativen Verläufe der Wand- und Fluidtemperatur in axialer Richtung dargestellt.

[7] (Kap. 4.2.9), [9] (Kap. H3.1), [22] (Kap. 14.5.20)