

B VERDAMPFUNG

1 Einleitung

Lösungen, die aus einem Lösungsmittel und einem darin gelösten, nicht flüchtigen Stoff bestehen, lassen sich durch einfaches Erwärmen trennen. Der Partialdruck der nichtflüchtigen Komponente ist wesentlich kleiner als der Partialdruck des Lösemittels, so dass der Dampf über der Lösung reines, gasförmiges Lösemittel ist.

Als Lösungsmittel liegt häufig Wasser vor, es kann sich aber auch - insbesondere in der chemischen Industrie- um organische Verbindungen handeln.

Zweck einer **Eindampfung** ist es, die Komponenten des gelösten Stoffes in der Lösung zu erhöhen, indem ein Teil des Lösemittels entfernt wird.

Beispiel: Eindicken von Obst- oder Fruchtsäften.

Bei vollständiger Trennung von Lösemittel und gelöstem Stoff spricht man von **Abdampfung**.

Beispiel: Zucker- oder Salzgewinnung aus Lösungen.

Von **Verdampfung** spricht man, wenn die Gewinnung des Lösungsmittels Vorrang hat.

Beispiel: Gewinnung von Trinkwasser aus Meereswasser

Bemerkung: in der Praxis unterscheidet man häufig nicht eindeutig zwischen den Begriffen.

Die erforderlichen Apparate zum Ein-, Ab- und Verdampfen nennt man **Verdampfer**. Diese liefern die erforderliche Wärme, um die Lösung zum Verdampfen zu bringen.

2 Wärmebedarf

2.1 Siedepunktserhöhung durch Dampfdruckerniedrigung

Die Bindungskräfte, die in einem reinen Lösungsmittel zwischen den Molekülen wirken, führen dazu, dass diese Flüssigkeit einen bestimmten Dampfdruck hat (siehe TVT A 2.1 Gesättigter Dampf).

Eine **Lösung L** besteht aus den Molekülen des **Lösungsmittels LM** und den Teilchen (Moleküle oder Ionen) des **gelösten Stoffes**.

Da zwischen allen Teilchen Anziehungskräfte wirken, ist der Dampfdruck der Lösung etwas geringer als der Dampfdruck des reinen Lösungsmittels.

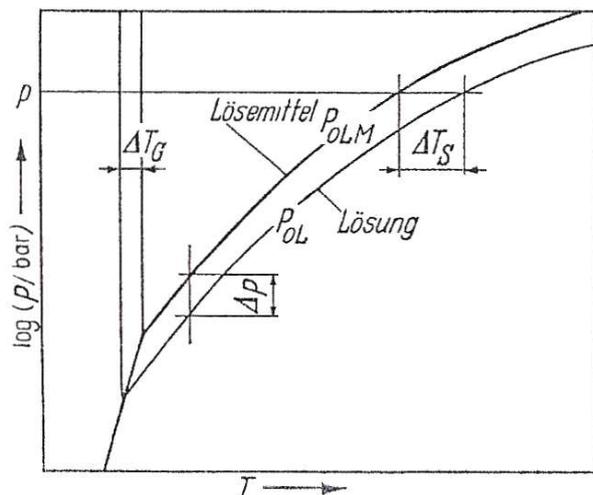


Abb.1: Dampfdruckkurven Lösungsmittel und Lösung (Quelle: Grassmann Widmer/Einführung in die TVT, überarbeitet)

Die Dampfdruckkurve der Lösung (Abb.1) liegt demzufolge unterhalb der Dampfdruckkurve des Lösungsmittels.

Bei konstanter Temperatur ist die **Dampfdruckerniedrigung** $\Delta p = p_{0LM} - p_{0L}$. Sie entspricht einer **Siedepunktserhöhung** ΔT_s bei **konstantem Druck**.

Um eine Lösung zum Sieden zu bringen, ist daher gegenüber dem reinen Lösungsmittel eine höhere Temperatur erforderlich.

Wie man weiterhin aus Abb.1 erkennt, liegt der Schmelzpunkt einer Lösung unterhalb dessen des reinen Lösungsmittels. Hier hat man eine **Gefrierpunktserniedrigung** durch **Dampfdruckerniedrigung**.

Informationen zur Siedepunktserhöhung:

Die Siedepunktserhöhung einer verdünnten Lösung (deren Molanteil an gelöstem Stoff viel kleiner ist als der Molanteil des Lösungsmittels) ist proportional

- der Molalität des gelösten Stoffes und
- dem Dissoziationsgrad des gelösten Stoffes.

Der Proportionalitätsfaktor ist eine Stoffeigenschaft des Lösungsmittels (, die so genannte ebullioskopische Konstante). Für Wasser beträgt der Faktor beispielsweise $0,51 \text{ K} \cdot \text{kg/mol}$.

2.2 Erforderliche Verdampfungswärme

Die erforderliche Wärmemenge zum Verdampfen (des Lösemittels) einer **Lösung beliebiger Temperatur** setzt sich aus der benötigten Wärme zum **Erreichen der Siedetemperatur** und der Wärme zum eigentlichen **Verdampfen** zusammen:

Wärmebedarf zum Verdampfen einer Lösung.

$$Q = Q_L + Q_V$$

Q: Gesamtwärme zum Verdampfen einer Lösung in J

Q_L: Wärmeenergie zum Erreichen der Siedetemperatur) in J

Q_V: Verdampfungswärme in J

Die Vorgänge lassen sich am besten in einem (spezifische Enthalpie, Massenanteil)-Diagramm ((h,w)-Diagr., Abb.2) veranschaulichen.

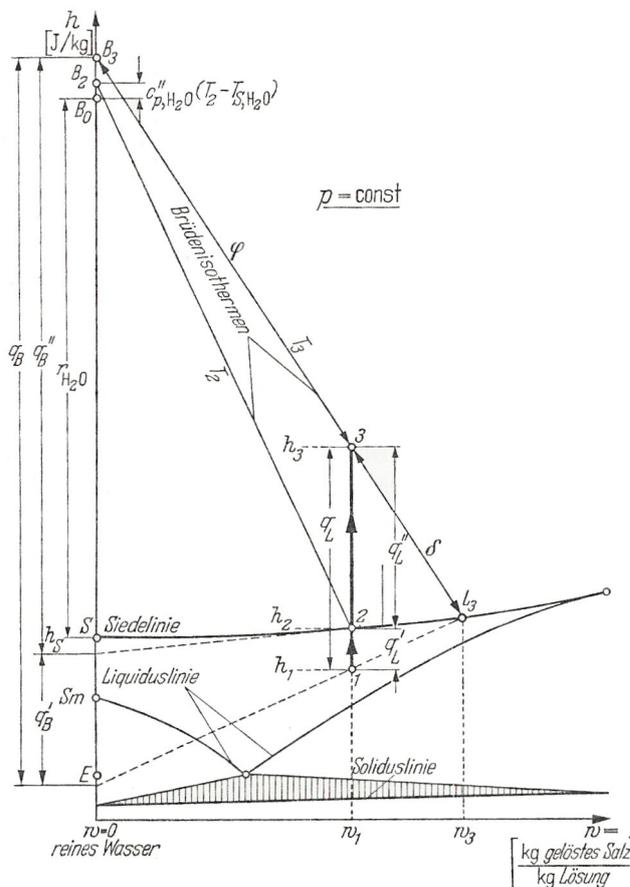


Abb.2: Verdampfung einer Lösung im (h, w)-Diagramm (Quelle: Grassmann, Widmer / Einführung in die TVT)

Der Massenanteil ist das Verhältnis der Masse an gelöstem Stoff zur Masse der gesamten Lösung.

$$w = \frac{m_i}{\sum m_i}$$

w: Massenanteil (-gehalt) in %/100

m_i: Masse des gelösten Stoffes in kg

Σm_i: Masse der Lösung in kg

Die erforderlichen Wärmemengen lassen sich aus einem solchen Diagramm herauslesen oder wie folgt berechnen:

Wärmebedarf ohne Aggregatzustandsänderung.

$$Q_L = m_L \cdot c_L \cdot (T_{s,L} - T_0)$$

- Q_L : Wärmeenergie zum Erreichen der Siedetemperatur) in J
 m_L : Masse der Lösung in kg
 c_L : Spezifische Wärmekapazität der Lösung in kJ/(kgK)
 $T_{s,L}$: Siedetemperatur der Lösung in K
 T_0 : Anfangstemperatur der Lösung in K

Durch die Wechselwirkung zwischen Lösungsmittel und gelöstem Stoff erhöht sich die Siedetemperatur der Lösung um den Betrag der Siedepunkterhöhung:

$$T_{s,L} = T_{s,LM} + \Delta T_s$$

Wärmebedarf zum Verdampfen des Lösungsmittels.

$$Q_V = m_{LM} \cdot r_{LM}$$

- Q_V : Verdampfungswärme in J
 m_{LM} : Masse an Lösungsmittel in kg
 r_{LM} : Spezifische Verdampfungswärme in kJ/kg

Der **Massenanteil w** des gelösten Stoffes in der Lösung steigt während des Verdampfens, da **nur Lösungsmittel** in Form von Brügendampf (oder Brüden) die Lösung verlässt. Daher steigt mit fortschreitender Verdampfung die Siedetemperatur aufgrund der Dampfdruckerniedrigung an.

Da die Änderung des Massenanteils jedoch meistens nicht sehr groß ist, kann diese Differenz meist vernachlässigt werden.

Des Weiteren ist häufig der Betrag der Siedepunktserhöhung so gering, dass man den Siedepunkt der Lösung mit dem Siedepunkt des Lösungsmittels gleich setzen kann:

$$T_{s,L} = T_{s,LM}$$

2.3 Zugeführter Wärmestrom

Verdampfer sind Wärmetauscher in denen eine Aggregatzustandsänderung stattfindet.

Der zu erwärmende Stoff wechselt vom flüssigen Zustand in den gasförmigen.

Die erforderliche Wärme wird dem Verdampfer über ein Heizmedium zugeführt. Hierzu wird häufig Wasser verwendet.

Wenn höhere Temperaturen erforderlich sind, kommen organische Verbindungen, die aus Erdöl oder synthetisch hergestellt werden, zum Einsatz.

Die Wärme, die dem Verdampfer zugeführt werden muss, berechnet sich analog zu Wärmetauschern:

Wärmestrom
Verdampfen
Lösungsmittels.

zum
des

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

\dot{Q} : Übertragener Wärmestrom in J/s

U : Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2K)$

A : Austauschfläche in m^2

ΔT_m : mittlere Temperaturdifferenz in K

Einerseits nimmt die Temperatur des Heizmediums beim Durchströmen des Wärmetauschers fortwährend ab. Andererseits steigen zunächst die Temperatur der Lösung und anschließend die Siedetemperatur des Lösemittels durch Siedeverzug.

Daher rechnet man mit empirisch ermittelten Formeln aus den Temperaturen an den Eingängen und Ausgängen des Wärmetauschers eine mittlere Temperaturdifferenz ΔT_m .

Vereinfacht kann als mittlere Temperaturdifferenz ΔT_m eines Verdampfers die Differenz zwischen der Temperatur des zugeführten Heizmediums T_{HM} und der Siedetemperatur des Lösemittels T_{LM} genommen werden.

Mittlere Temperatur-
differenz bei der
Verdampfung.

$$\Delta T_m = T_{HM} - T_{S,L}$$

ΔT_m : Mittlere Temperaturdifferenz in K

T_{HM} : Temperatur Heizmedium in K

$T_{S,L}$: Siedetemperatur Lösung in K

3 Verdampferbauarten

Es gibt eine kaum überschaubare Anzahl von unterschiedlichen Verdampferbauarten.

Die Apparateauswahl erfolgt häufig nach Tradition, Erfahrung und Verfügbarkeit. Als Auswahlkriterien sind Eigenschaften der Lösung (wie Korrosion, Verkrustung der Heizflächen durch unlösliche Stoffe oder Ablagerungen von Salzen gelöster Stoffe, thermische Zersetzung) und Intensität des Wärmeübergangs zu berücksichtigen.

Grundsätzlich lassen sich die Bauarten nach verschiedenen Merkmalen unterscheiden. Man findet in den Anlagen vorwiegend kontinuierlich arbeitende, geschlossene Verdampfer, die indirekt mit Wasserdampf beheizt werden, je nach Anforderungen als einzelne Apparate oder als Mehrkörper.

3.1 Kontinuierliche und diskontinuierliche Betriebsweise

Wird ein Verdampfer einmalig gefüllt und nach dem Verdampfungsprozess entleert, spricht man von **diskontinuierlicher Betriebsweise** oder Chargen („batch“)-Betrieb.

In der Praxis findet man vorwiegend **kontinuierlich arbeitende**, geschlossene Verdampfer, die den fortwährenden Betrieb eines Produktionsprozesses ermöglichen.

Der Massenanteil des Konzentrates hängt neben der Konzentration der Ausgangslösung von der **Verdampferleistung** und dem Durchsatz (**Massenstrom**) der Anlage ab.

Nachfolgend zwei typische Verdampferbauarten:

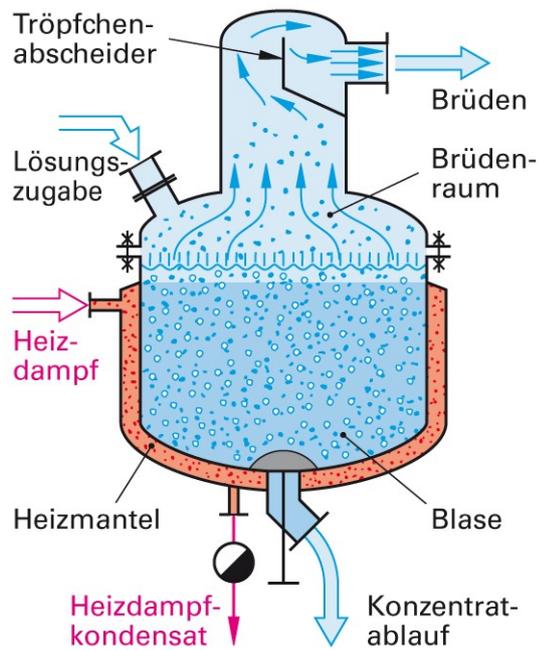


Abb.3: Blasenverdampfer (Quelle: Europa-Lehrmittel)

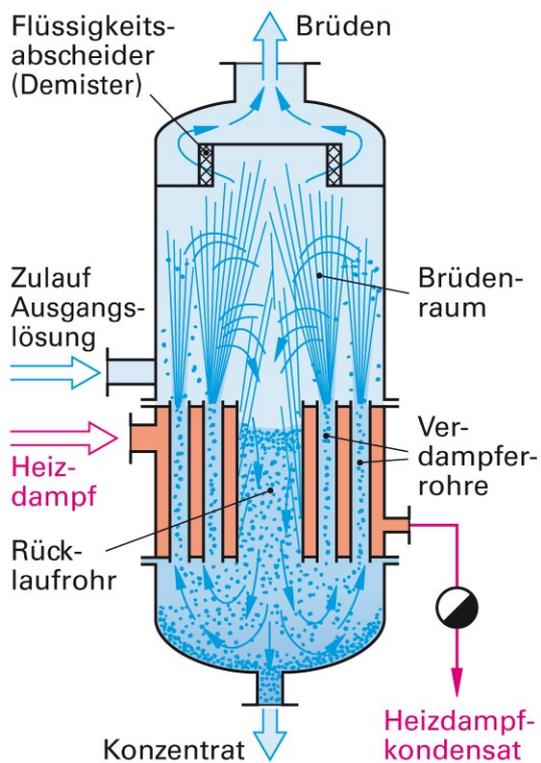


Abb.4: Röhrenverdampfer (Quelle: Europa-Lehrmittel)

3.2 Offene und geschlossene Bauweise

Die meisten Verdampfer sind **geschlossene Apparate**, in denen der Brüdensampf über Rohranschlüsse abgezogen wird.

Bei **offenen Verdampfern** (Kesseln oder Pfannen) entweichen die aufsteigenden Gase (Brüden genannt) in die Atmosphäre.

3.3 Direkt und indirekt beheizte Verdampfer

Eine **direkte Beheizung** bedeutet, dass das Heizmittel in die Lösung gegeben wird.

Bei **indirekter Beheizung** ist der so genannte **Naturumlauf** dadurch bedingt, dass die an der Heizfläche aufgewärmte Lösung eine geringere Dichte hat und somit aufsteigt, während die frische oder weiter von der Heizfläche entfernte Lösung kälter und damit schwerer ist. Es entsteht somit eine Zirkulation von Lösung, die an der Heizfläche aufsteigt und Lösung, die außerhalb absinkt. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit, desto besser ist der Wärmeübergang (durch Konvektion).

Die Umlaufgeschwindigkeit kann bei einem **Zwangsumlauf** durch Einsatz einer Pumpe erhöht werden. Dadurch wird auch die Gefahr von Verkrustungen der Heizflächen vermindert.

3.4 Einstufen- und Mehrstufenverdampfer

Um bei Verdampfern die Wärme bestmöglich auszunutzen und die Anlage somit möglichst wirtschaftlich zu betreiben, gibt es mehrere Möglichkeiten der **Wärmerückgewinnung**:

- Zum einen **wärmt** man die **Ausgangslösungen** (verdünnten Lösungen) **vor**.
Hierzu können die so genannten „Abfallwärmen“ verwendet werden, die bei dem Prozess anfallen. Dies sind die **Wärmen** des **Konzentrats**, der **Brüden** und des **kondensierten Heizdampfes**.
- Zudem versucht man, die **Kondensationswärme** der **Brüden** zu verwenden. Dabei müssen zwei Probleme gelöst werden:
 - Die Siedetemperatur der Lösung $T_{S,L}$ ist um die Temperaturdifferenz ΔT_S höher als die Siedetemperatur der Brüden $T_{S,LM}$, die aus reinem Lösemittel bestehen.
Die Kondensationswärme der Brüden kann daher erst verwendet werden, nachdem die gasförmigen Brüden um die Temperaturdifferenz ΔT_S abgekühlt sind.
 - Die Kondensationstemperatur der Brüden muss höher als die Siedetemperatur der Lösung sein, damit eine Wärmeübertragung stattfinden kann.
Die Temperaturdifferenz für eine wirtschaftliche Wärmeübertragung sollte 10°C bis 20°C betragen.

3.4.1 Einstufenverdampfer

Am Beispiel der **Einstufenverdampfer** wird erklärt, wie die **Kondensationswärme** der **Brüden** zum **Heizen** der **Lösung** verwendet werden kann.

Die Brüden entstehen im Verdampfer beim Druck p_1 mit der Siedetemperatur der Lösung, das heißt als überhitzter Dampf mit einer Temperatur $T_{S,L}$ (Abb.5).

Diese ist um die Temperaturdifferenz ΔT_s höher als die Siedetemperatur des reinen Lösungsmittels.

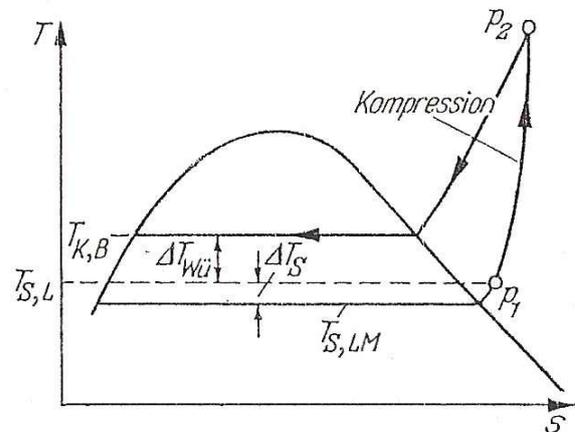


Abb.5: Brüdenkompression (Quelle: Grassmann Widmer/Einführung in die TVT, überarbeitet)

Die Brüden werden auf einen Druck p_2 **komprimiert**, bei dem die Siedetemperatur des Lösemittels (d.h. der Brüden) ca. 10°C bis 20°C über der Siedetemperatur der Lösung liegt. Die Brüden können dann durch Wärmeabgabe unmittelbar kondensieren.

Da die Verdampfungswärme der Brüden gleich groß ist wie deren Kondensationswärme (im T,s-Diagramm die Fläche unterhalb der Isobaren im Nassdampfgebiet), muss beim kontinuierlichen Betrieb (Abb.6) zusätzlich nur die Wärme zugeführt werden, die durch Verluste an die Umgebung verloren geht.

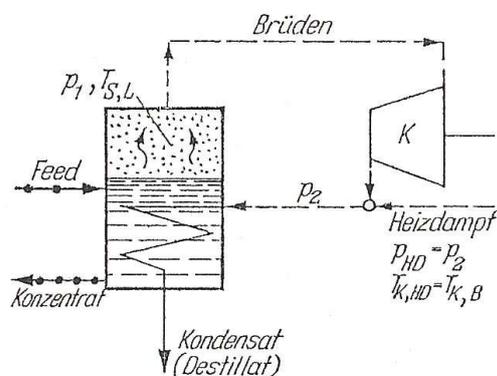


Abb.6: Einkörperverdampfer mit Brüdenkompression (Quelle: Grassmann Widmer/Einführung in die TVT)

Die Druckdifferenz $p_2 - p_1$ wird durch einen Kompressor aufgebracht, sie muss möglichst gering sein, damit die Anlage wirtschaftlich betrieben werden kann.

Zum Anfahren des Verdampfers wird Heizdampf gebraucht.

3.4.2 Mehrstufenverdampfer

Mehrstufenverdampfer sind einige **hintereinander** oder **parallel geschaltene** Verdampfer.

- Man spricht von **parallel geschalteten** Verdampfern (Abb.7), wenn die Lösung auf zwei oder mehr Verdampfer aufgeteilt wird. Die Volumenströme sind meistens unterschiedlich, ebenso die Konzentrationen der Ausgangslösungen hinter den Verdampfern.

Die Brüden aus einem Verdampfer werden jeweils zum Heizen des nächsten Verdampfers verwendet. Dies bedingt allerdings, dass in diesem Verdampfer eine niedrigere Siedetemperatur vorliegt. Dort muss daher ein geringerer Arbeitsdruck (durch Erzeugen von Unterdruck) gewählt werden.

Diese Druckminderung im Verdampferraum erfordert den Einsatz von Vakuumpumpen.

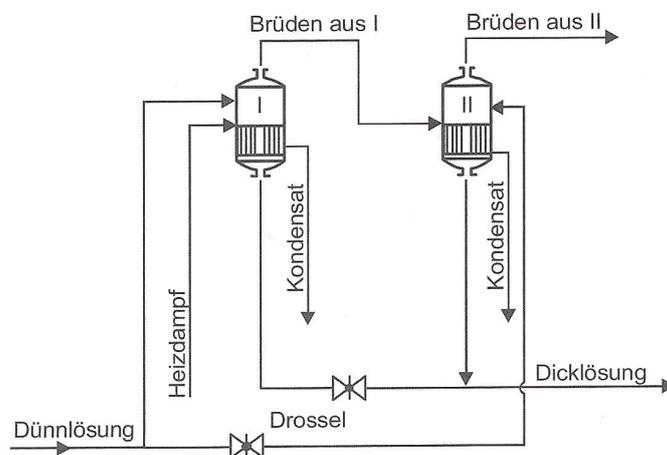


Abb.7: Zweistufige Verdampferanlage im Parallelbetrieb (Quelle: Schwister/Taschenbuch der Verfahrenstechnik)

- Mit **hintereinander geschalteten** Verdampfern erhält man eine **höhere Konzentration** der Lösung im **letzten Verdampfer**.

Man unterscheidet dabei zwischen **Gleichstrombetrieb** und **Gegenstrombetrieb**.

- Im **Gleichstrombetrieb** (Abb.8) wird die Kondensationswärme des ersten Verdampfers zum Heizen des 2. Verdampfers verwendet. Da die Kondensationswärme der Brüden quasi gleich der Verdampfungswärme des Lösungsmittels ist, kommt man bei mehreren Verdampfern ab dem 2. Verdampfer fast ohne Heizdampf aus.

Ähnlich wie bei parallel geschalteten Verdampfern muss ab dem zweiten Verdampfer der Arbeitsdruck gesenkt werden, damit die Siedetemperaturen der Lösungen geringer als die Kondensationstemperaturen der Brüden sind.

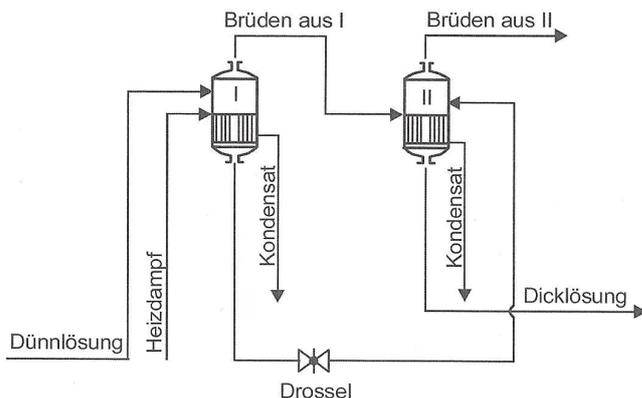


Abb.8: Zweistufige Verdampferanlage im Gleichstrombetrieb
(Quelle: Schwister/Taschenbuch der Verfahrenstechnik)

Ein Vorteil der niedrigen Siedetemperaturen (aufgrund der niedrigen Drücke) liegt darin, dass die Lösungen thermisch schonender getrennt werden.

- Im **Gegenstrombetrieb** (Abb.9) strömen die Brüden aus dem zweiten oder letzten Verdampfer dem vorhergehenden als Heizmittel entgegen. Damit ihre Temperatur hoch genug ist, muss die Siedetemperatur der Lösung im zweiten oder letzten Verdampfer höher sein. Daher müssen die Lösungen ab dem zweiten Verdampfer durch den Einsatz von Pumpen auf jeweils höhere Drücke gebracht werden.

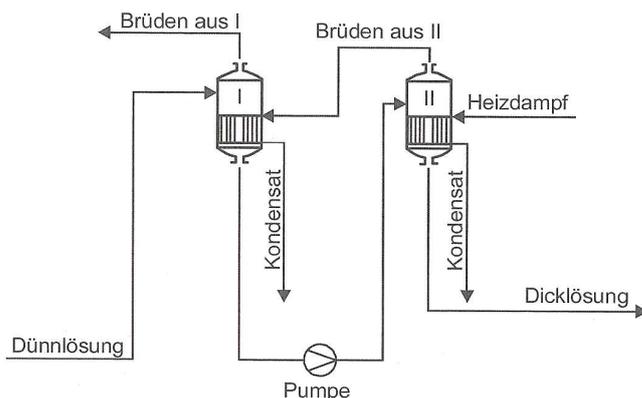


Abb.9: Zweistufige Verdampferanlage im Gegenstrombetrieb
(Quelle: Schwister/Taschenbuch der Verfahrenstechnik)

Allgemein werden bei Mehrstufenverdampfern aus wirtschaftlichen Gründen meistens zwei oder drei Verdampfer verwendet. Bei mehr Stufen werden die Heizmitteleinsparungen gering gegenüber den Mehrkosten durch Anlagenkomponenten.