



Niels Wellner (Autor)
**Entwässerung Ionischer Flüssigkeiten mittels
Fallfilmverdampfung**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7435>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



1. Einleitung

Ionische Flüssigkeiten, oft auch als „Ionic Liquids“ oder „Room Temperature Ionic Liquids“ bezeichnet, sind eine außerhalb des Labors erst seit wenigen Jahren eingesetzte Stoffklasse neuer Materialien (new materials), zu denen neben den Ionic Liquids auch Produkte der Nanotechnik zählen. Diese Ionic Liquids, üblicherweise als „IL“ abgekürzt, bestehen ausschließlich aus Ionen, welche organisch oder anorganisch sein können. Sie sind auf Grund der speziellen Charakteristik der genutzten An- und Kationenkombination bereits bei unter 100 °C flüssig. Als Vergleich dazu kann das als Kochsalz bekannte Natriumchlorid dienen. Es besteht ebenfalls nur aus Ionen (Na^+ und Cl^-), liegt aber erst bei Temperaturen über 800 °C flüssig vor (Wasserscheid & P, 2003). Ähnlichkeiten sind der niedrige Dampfdruck, welcher eine Verdampfung nahezu unmöglich macht, und die Hygroskopie.

Während der geringe Dampfdruck für viele Prozesse einen großen Vorteil darstellt, insbesondere bei der thermischen Trennung, kommt es durch die Hygroskopie in vielen Fällen zu unerwünschten Effekten. So beeinflusst der Wassergehalt direkt die Stoffeigenschaften, zum Beispiel Viskosität und Azidität. Allerdings gibt es auch bereits Prozesse, in denen eine Veränderung des Wassergehaltes gezielt als Verfahrensschritt eingesetzt wird, um beispielsweise selektiv die Löslichkeit zu beeinflussen und so eine Fällung herbeizuführen (Kosan, 2010). Daher kann es erforderlich sein, den Wassergehalt gezielt einstellen zu können. Ebenfalls kann bei einigen IL im Zuge der Synthese bereits Wasser als Nebenprodukt auftreten, welches dann eine Verunreinigung darstellt und vor dem Verkauf entfernt werden muss.

IL können mit bisherigen Lösemitteln preislich und ökologisch nur konkurrieren, wenn die IL möglichst lange im Prozess verbleiben und wiederholt eingesetzt werden können. Dazu ist ein Verfahren zur Abtrennung von Verunreinigungen dringend notwendig, welches in der Lage ist, in den Prozess als Reinigungsschritt integriert zu werden. Für diese Aufreinigung muss ein Verfahren angewendet werden, das sowohl in der Lage ist, andere Komponenten thermisch schonend von der IL zu separieren als auch variable Volumenströme und Verunreinigungsanteile zuverlässig abzutrennen.

Hierzu bieten sich Fallfilmverdampfer an. Diese sind in der Industrie bereits für die Verarbeitung thermisch sensitive Produkte etabliert. Solange eine Mindestberieselungsdichte gewährleistet ist, eignen sie sich in einem gewissen Rahmen auch für schwankende Volumenströme. Mit ihnen ist es



möglich, über die Variation von Prozessdruck und -temperatur, Einfluss auf den Wassergehalt, hier als Modellverunreinigung betrachtet, des ablaufenden Stromes zu nehmen.

Bei Fallfilmverdampfern handelt es sich um eine Verdampferbauform, bei der ein dünner Film des einzudampfenden Mediums schwerkraftgetrieben zumeist an der Innenseite eines beheizten Rohres abrieselt und dabei partiell verdampft. Fallfilmverdampfer werden in der Lebensmittel- und der Pharmaindustrie bereits seit langem eingesetzt [Konrad, 1971] und stellen ein etabliertes Verfahren zur Abtrennung von verdampfbaren Komponenten dar. Als Beispiele seien hier die Zuckerherstellung sowie die Wirkstoff-Aufreinigung genannt [Lehnberger, 2002]. In diesen beiden Industriesparten wird der besondere Vorteil der Fallfilmverdampfung genutzt: Die Möglichkeit thermisch empfindliche Produkte einzudampfen ohne sie zu schädigen. Dies wird durch eine vergleichsweise geringe Temperaturdifferenz zwischen der beheizten Wand und dem Film ermöglicht. Weiterhin ist die Verweilzeit an der beheizten Wand im Vergleich zu einem Bulk-Verdampfer, wie zum Beispiel einem Rotationskolbenverdampfer, sehr kurz, so dass die Dauer der thermischen Belastung minimiert werden kann. Durch den dünnen Film ist außerdem der Weg von der heißen Wand an die Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Dampf sehr gering, was ein Ausdampfen erleichtert.

In der vorliegenden Arbeit wird die Eignung eines Fallfilmverdampfers zur Entwässerung Ionischer Flüssigkeiten untersucht. Hierbei wird vornehmlich der Einfluss der Parameter Druck, Temperatur sowie Feedvolumenstrom auf den minimal erzielbaren Wassergehalt betrachtet. Hierzu wurden Versuchsreihen durchgeführt, um ein mathematisches Modell zu erstellen, welches eine Auslegung von Fallfilmverdampfern zur Entwässerung von IL unterstützen kann.

Zunächst soll kurz auf die theoretischen Grundlagen der Fallfilmverdampfung und der Ionischen Flüssigkeiten eingegangen werden. Anschließend werden die Versuchsanlagen vorgestellt sowie die Experimente beschrieben. Nachfolgend wird das mathematische Modell vorgestellt, mit dem eine Beschreibung der IL im Zustandsraum von Druck, Temperatur und Durchflussrate möglich ist. Dieses Modell wurde auf Basis der Versuchsergebnisse erstellt. Hierbei werden Wassergehalt und Viskosität als Variable betrachtet, die bei vorgegebenen Prozessparametern im erstellten Modell berechnet werden können.

2. Forschungsstand

Im folgenden Kapitel wird kurz der Stand der Forschung für die beiden für diese Arbeit wichtigen Bereiche, „Fallfilmverdampfung“ und „Ionische Flüssigkeiten“, dargestellt. Bei letzteren wird ein kurzer historischer Abriss gegeben, dann auf die Besonderheiten dieser neuen Materialien eingegangen, die für diese Arbeit wichtig sind. Bei der Fallfilmverdampfung werden apparative Konzepte, Auslegungsgrundlagen und etablierte industrielle Verfahren vorgestellt. Da bisher noch keine Forschung zum Verhalten von IL in Fallfilmverdampfern vorliegen, werden diese beiden Themen hier getrennt dargestellt und dann in der Ergebnisdiskussion vereinigt. Abschließend wird die Einordnung dieser Arbeit in die wissenschaftliche Umgebung dargestellt.

2.1 Ionische Flüssigkeiten

Als Ionische Flüssigkeiten, aus den engl. „Ionic Liquid“, abgekürzt „IL“, werden Salze bezeichnet, deren Schmelzpunkt bei Normalbedingungen unter 100 °C liegt. Hierbei ist zu bemerken, dass damit ein Reinstoff bestehend aus Anion und Kation gemeint ist, keine Lösung von Ionen in einem Lösemittel. Die Stoffklasse der Ionischen Flüssigkeiten wurde bereits 1914 von Paul Walden erstmalig beschrieben [Wasserscheid et al., 2003]. Sie erlebt jedoch erst seit einigen Jahren ein verstärktes Interesse aus Forschung und Industrie. Hierzu sei auf Abb. 2.1 verwiesen, in der die Anzahl der Veröffentlichungen pro Jahr aufgetragen ist, die „Ionic Liquid“ in Titel oder Abstract als Schlagwort enthalten. Die Abbildung wurde mit Daten aus „Scopus“ erstellt und zeigt anschaulich die wachsende Forschungsaktivität auf diesem Gebiet. Auf industrieller Seite kann als Beispiel für das Interesse der von der BASF SE entwickelte „BASIL“ Prozess herangezogen werden, mit dem eine großtechnische Produktion von IL möglich ist (Mase, 2004). Die großtechnische Herstellung von IL kann dazu beitragen, deren Preis zu senken und somit IL in wirtschaftlicher Konkurrenz zu etablierten Prozessmedien (Lösemitteln, Katalysatoren) zu setzen.

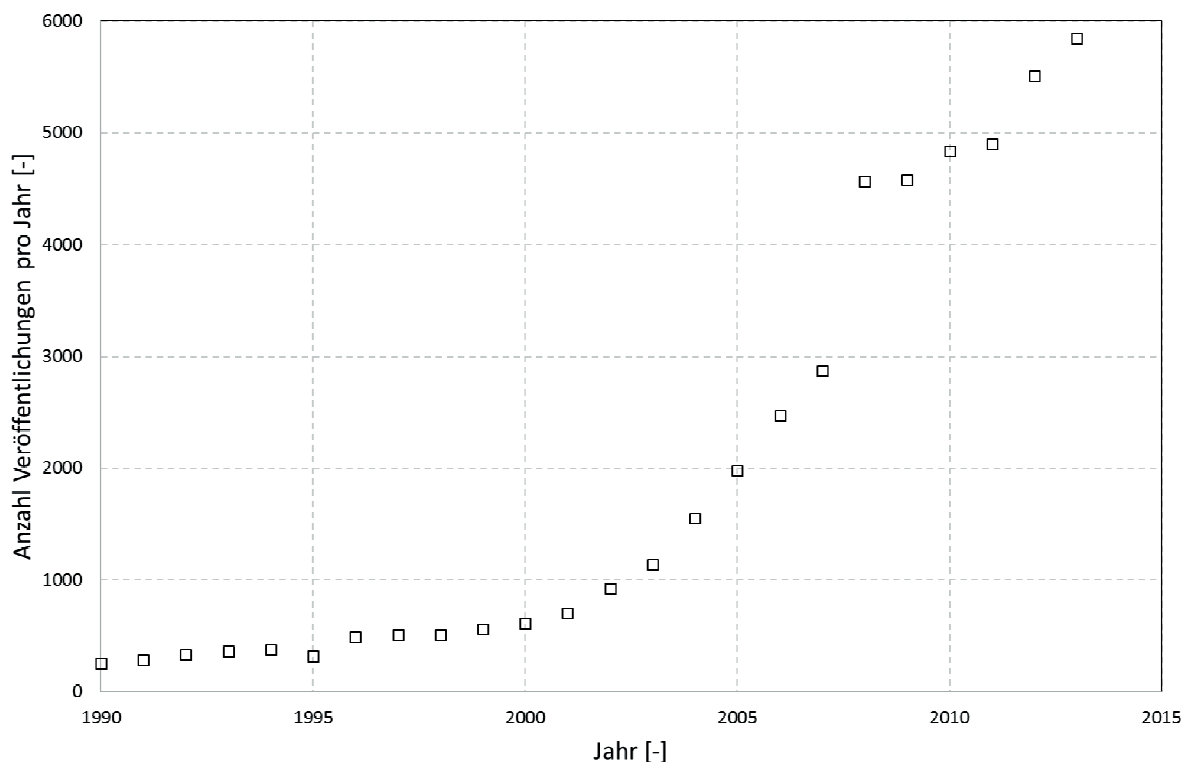


Abb. 2.1: Veröffentlichungen zum pro Jahr Thema „Ionic Liquid“ in Scopus

Bei den Kationen in IL handelt es sich überwiegend um organische Moleküle wie z.B. Imidazolium, Pyridine und Ammoniumverbindungen. Die Anionen können aus Halogeniden wie zum Beispiel Fluor, Chlor und Brom bis hin zu komplexeren Strukturen wie Amiden oder Imiden sowie Triflaten und Hexafluorophosphaten bestehen [Wasserscheid et al., 2003]. Für die Kombination der Ionen ergibt sich eine große Variationsbreite, da relativ einfach Seitenketten verändert, beispielsweise eine Methyl- durch eine Ethylgruppe ersetzt, oder funktionelle Gruppen getauscht werden können. Mit jeder Veränderung lassen sich die Stoffeigenschaften verändern. Da dies hier systematisch und zielgerichtet möglich ist, sind theoretisch mehr als 10^{12} verschiedene IL denkbar [Wasserscheid et al., 2003]. Natürlich sind nicht sämtliche dieser möglichen Kombinationen sinnvoll, doch es zeigt die große Bandbreite an Möglichkeiten, die mit dieser Stoffklasse realisierbar ist.

Ionische Flüssigkeiten zeichnen sich als Stoffklasse durch ihren sehr geringen Dampfdruck aus. Dieser liegt üblicherweise in der Größenordnung von 10^{-10} bar und ist somit in derselben Größenordnung wie der Dampfdruck flüssigen Eisens. Dies bedeutet, dass IL nahezu nicht in die Dampfphase überführt werden können. Auf Grund dieser Eigenschaft werden IL bereits in Flüssigkeitsringspaltpumpen und in einer anderen Anwendung als „liquid piston“ (flüssiger Pumpenkolben) eingesetzt [Kömpf,



2006]. Da sie nicht nennenswert ausdampfen, kann so eine Verunreinigung des geförderten Fluids, in vielen Fällen hochreine Gase wie zum Beispiel Wasserstoff, vermieden und ein geringerer Druck als mit konventionellen Prozessfluiden erreicht werden. Zusätzlich entfällt eine Schmierung, welche bei bewegten Metallteilen sonst notwendig ist. Das hierzu notwendige Schmiermittel kann ebenfalls eine Verunreinigung in der geförderten Phase bewirken.

Weiterhin bietet der geringe Dampfdruck auch in der Anwendung von IL als Lösemittel oder „Entrainer“ in der Rektifikation große Vorteile [Kuschnerow et al., 2011], da IL als Nichtsieder fungieren. Dies ermöglicht eine Abtrennung nahezu sämtlicher anderer Fluide durch geeignete Wahl von Druck und Temperatur. Somit können IL als selektive Lösemittel eingesetzt werden, wobei wieder, wie bereits bei der Optimierung als Prozessfluid, die Eigenschaft als „designer solvents“ einen zusätzlichen Vorteil bietet. Durch Variation der funktionellen Gruppen und Seitenketten können IL gezielt für selektive Löslichkeiten optimiert werden [Wasserscheid et al., 2003].

Eine Optimierung kann aber nicht nur in Bezug auf Löslichkeit vorgenommen werden, sondern auch für jede andere Stoffeigenschaft. Beispielhaft seien hier die Viskosität sowie deren Veränderung als Funktion der Temperatur vorgestellt. Bei klassischen kohlenwasserstoff-basierten Schmiermitteln wie Ölen sinkt die Viskosität mit steigender Temperatur. Dies hat den Nachteil, dass im kalten Zustand, zum Beispiel beim Anlaufen der Maschine oder eines Motors, die Schmierung und Benetzung der Flächen nicht optimal realisiert werden kann. Entsprechende IL zeigen lediglich eine geringere Temperaturabhängigkeit der Viskosität und schmieren somit temperaturunabhängig gleich gut. Hierzu wurden bereits orientierende Versuche in einem Kfz-Motor durchgeführt, die eine technische Umsetzbarkeit sowie einen geringeren Treibstoffverbrauch zeigten [Schlücker, 2011].

Ein weiterer Einsatzbereich ist die Nutzung der IL als Katalysator [Kuschnerow et al., 2013], [Wasserscheid et al., 2003]. Katalysatoren dienen zur Beschleunigung einer Reaktion sowie zum Herabsetzen der dafür benötigten Aktivierungsenergie. Üblicherweise liegt der Katalysator bei einer zwei Phasen Katalyse als Feststoff vor. Das Reaktionsgemisch wird fluidisch daran vorbeigeführt und die Reaktion findet an der Phasengrenzfläche statt. Hierbei liegt der Vorteil in der einfachen Trennung von Reaktionsgemisch und Katalysator nach der Reaktion. Nachteilig ist jedoch die Limitierung auf die Phasengrenzfläche und somit eine geringe Ausnutzung der Katalysatoroberfläche. Daher liegen bei



feststoffkatalysierten Reaktionen die Umsatzraten meist unterhalb der einphasigen Katalyse.

Bei der einphasigen oder homogenen Katalyse liegen Reaktionsgemisch und Katalysator in derselben Phase, üblicherweise flüssig, vor. Durch die intensivere Vermischung wird eine größere Grenzfläche als bei der zweiphasigen Katalyse realisiert. Diese vergrößerte Grenzfläche ermöglichte höhere Umsatzraten und eine bessere Katalysatorausnutzung. Der Nachteil dieser Methode liegt in der Trennung von Katalysator und Reaktionsgemisch. Da hier beide in einer Phase, meist flüssig, vorliegen, ist eine vollständige Abtrennung des Katalysators aus dem Reaktionsgemisch meist nur schwierig oder unvollständig zu realisieren.

Hier bieten IL einen systematischen Vorteil. Da IL nicht verdampfen, kann das Gemisch nach der Reaktion einfach eingedampft werden, um so im Brüden lediglich das Reaktionsgemisch vorzufinden. Eine Abtrennung ist somit leicht möglich, das Reaktionsgemisch kann danach frei von Katalysator dargestellt werden, die Aufarbeitung ist dabei wesentlich einfacher als im konventionellen Prozess. Ein Verlust an Katalysator über den Produktaustrag findet so ebenfalls nicht statt, das Verfahren kann so wirtschaftlicher werden.

Dieses Verfahren der Katalyse wurde erfolgreich durchgeführt [Kuschnerow et al., 2013]. Hierbei wurde eine derzeit schwefelsäurekatalysierte Umesterungsreaktion betrachtet. Die Säure muss nach der Katalyse neutralisiert und die dabei entstehenden Reststoffe als Abfall entsorgt werden. Als neuartiges Verfahren wurde in dieser Arbeit eine IL als Katalysator verwendet. Die IL konnte im Reaktor verbleiben und so länger genutzt werden. Ein Recycling der IL war möglich, so dass eine längerer Verwendung und die Vermeidung von Abfall zusätzliche Vorteile darstellen [Kuschnerow et al., 2011]. Fällt weniger Abfall an, sinken die Entsorgungskosten pro Menge des hergestellten Produkts.

Auch in der Verarbeitung von Biomasse werden IL eingesetzt. Hier wird vor allem die Gewinnung, Aufreinigung und Umsetzung von Zellulose betrachtet [Kosan, 2010], [Tan, 2009]. Diese stellt als Grundstoff für ein breites Spektrum an Anwendungen und auf Grund ihrer organischen Herkunft ein großes Potential dar.

Weiterhin wurde bereits erwähnt, dass IL hygroskopisch, also Wasser einlagernd, sind. Diese Eigenschaft ist je nach IL unterschiedlich ausgeprägt, liegt aber im geringen Maße selbst bei hydrophoben IL vor [Cao et al., 2013]. Somit steigt der Wassergehalt bei IL bereits bei Kontakt mit der feuchten Umgebungsluft mit der Zeit bis zum Gleichgewicht an.



Zusätzlich ist es möglich, dass Wasser bereits als Nebenprodukt der Synthese in der IL vorhanden ist oder bei der Verwendung als Katalysator oder Prozessfluid eingetragen wird. Soll die IL mit einer gewissen Reinheit dargestellt werden oder ist ein definierter Wassergehalt für einzelne Prozessschritte erforderlich, müssen Verfahren eingesetzt werden, um den Wassergehalt entsprechend einzustellen.

Der Wassergehalt hat bei vielen IL auch Auswirkungen auf Stoffeigenschaften, wobei hier besonders die Viskosität und die Korrosivität zu nennen sind. Je nach IL können schon Änderungen im Wassergehalt unter einem Prozentpunkt deutliche Auswirkungen auf die Viskosität haben [Scholl et al., 2011], [Wellner et al., 2011]. Die Viskosität hat einen entscheidenden Einfluss bei der Verwendung als Prozessfluid [Kondo, 2012]. Eine hohe Viskosität erfordert einen höheren Energieeinsatz beim Pumpen, ggf. die Verwendung anderer Pumpsysteme. Mischungsvorgänge in Rührkesseln benötigen für Fluide mit hoher Viskosität mehr Zeit und ebenfalls einen höheren Energieeintrag über den Rührer, eine dabei auftretende Erwärmung des Mediums muss ggf. über Kühlung ausgeglichen werden. Daher müssen Anwendungen mit hochviskosen Medien speziell ausgelegt werden. Ändert sich die Viskosität auf Grund von Wassergehaltsänderungen kann der Prozessablauf nachhaltig gestört werden.

Auch Versuche zum Dampfdruck bei IL-Wasser-Gemischen wurden im Labormaßstab durchgeführt. Hierbei wurden sowohl binäre als auch ternäre Mischungen vermessen, auch wurden Alkohole als Lösemittel verwendet. Beispielhaft sei hier auf die Arbeit von Jun Feng Wang, Chun Xi Li und Zi Hao Wang [Wang et al., 2007] und Héctor Rodríguez und Joan F. Brennecke [Rodríguez et al., 2006] genannt. Erstere untersuchten Mischungen aus 1-Ethyl-3-methylimidazolium Ethylsulfat in Mischungen mit Wasser und Methanol bzw. Ethanol. Hierbei wurden Dampfdrücke bei Temperaturen zwischen 296 und 345 K untersucht.

Letztere untersuchten die Viskosität und Dichte bei binären Mischungen aus 1-Ethyl-3-methylimidazolium Ethylsulfat, 1-Ethyl-3-methylimidazolium Trifluoromethansulfonat sowie 1-Ethyl-3-methylimidazolium Trifluoroacetat jeweils mit Wasser im Bereich von 278.15 bis 348.15 K bei Umgebungsdruck. Es konnten entsprechende Diagramme erstellt werden, die Dichte, Wassergehalt und Temperatur korrelieren. Dies wird analog in dieser Arbeit vorgestellt.

2.2 Fallfilmverdampfung

2.2.1 Verfahren und Einsatzgebiet der Fallfilmverdampfung

Fallfilmverdampfer werden in der chemischen, Lebensmittel- und Pharmaindustrie bereits häufig zur Abtrennung von Leichtsiedern aus thermisch sensiblen Medien benutzt. Hierbei wird die zu trennende Flüssigkeit in einem dünnen Film an der Innenseite des Verdampferrohres schwerkraftgetrieben abgerieselt. Bei Fallfilmverdampfern wird der Film dabei allein durch die Schwerkraft ausgebildet. Wischer oder Rollen zur Vermischung, Erhöhung der Turbulenz und Stabilisierung des Films werden im Unterschied zu Dünnschichtverdampfern nicht eingesetzt. Abbildung 2.2 zeigt den typischen Aufbau eines Fallfilmverdampfers mit Dampfbeheizung.

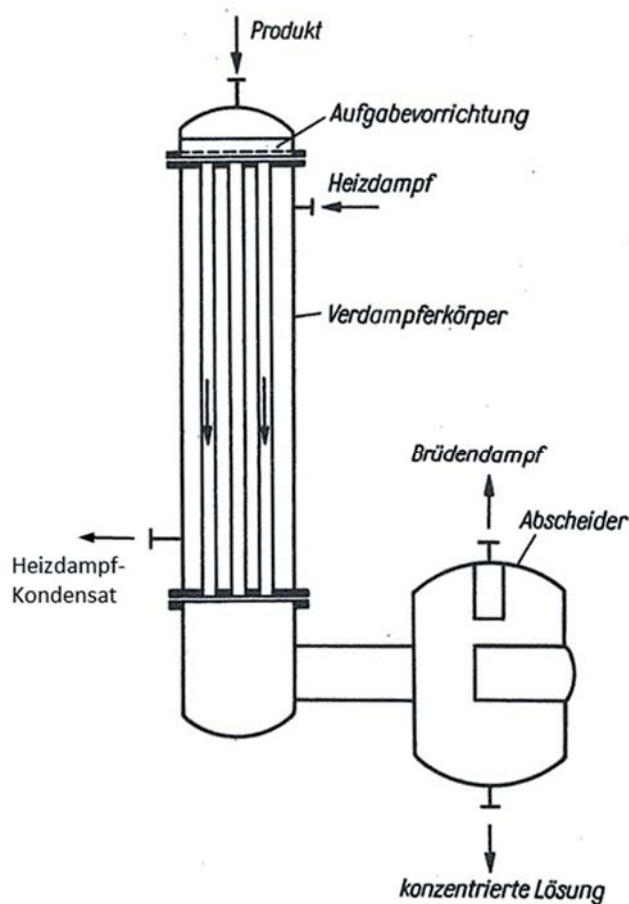


Abb. 2.2: Schemazeichnung eines Fallfilmverdampfers nach [Weiß, 1987]

Der Vorteil der thermischen Schonung des Produktes, der ein Hauptgrund für ihren Einsatz in oben genannten Industrieenanwendungen ist, ergibt sich aus der vergleichsweise kurzen Verweilzeit der Flüssigkeit an der beheizten Wand sowie die geringe Temperaturüberhöhung dort auf Grund des dünnen Filmes. Die Filmdicke beträgt üblicherweise zwischen 0,1 und 2 mm [Al-Sibai, 2004]. Daher liegt die benötigte Wandtemperatur deutlich unterhalb

derer, die bei fast vollständig gefluteten Rohren, zum Beispiel bei Naturumlaufverdampfern, notwendig ist. Weiterhin ist beim Fallfilmverdampfer die Entkopplung von Umlaufstrom und Energieeintrag möglich. Diese sind beispielsweise in Selbstumlaufverdampfern immer gekoppelt und reduzieren bei diesen Anlagen den Freiheitsgrad im Betrieb. Bei Fallfilmverdampfern jedoch kann die Berieselungsdichte, also der umlaufende Strom, unabhängig von der Wärmestromdichte eingestellt werden. Allerdings ist hierbei immer darauf zu achten, eine minimale Berieselungsdichte nicht zu unterschreiten, da sonst trockene Stellen auf der Rohrwand auftreten können. Diese führen zu Zonen lokal erhöhter Temperatur. Eine lokal erhöhte Temperatur kann die Qualität des Produktes reduzieren, Fouling verstärken oder das Produkt sogar zerstören. Weiterhin wird dadurch auch die wärmeübertragende Fläche reduziert, was zu einem geringeren Energieeintrag in die Flüssigkeit führen kann.

2.2.2 Bauformen von Fallfilmverdampfern

Die Stromführung der Flüssigkeit und der daraus ausgedampften Brüden kann je nach Verfahrensanforderung oder vorhandener Anlagen im Gleich- und Gegenstrom realisiert werden. Hierbei sind für jede Betriebsweise die jeweiligen Besonderheiten zu beachten. So kann es bei hohen Dampfvolumenströmen im Gleichstrom zu einer Beschleunigung des Flüssigkeitsfilmes kommen. Dadurch reduziert sich die Verweilzeit, allerdings wird die Turbulenz an der Oberfläche erhöht. Im Gegenstrom kann es zum umgekehrten Verhalten kommen, wenn der nach oben strömende Dampf die abrieselnde Flüssigkeit aufstaut. Dies wird als Entrainment bezeichnet [Arndt, 2011]. Daraus resultiert eine verlängerte Verweilzeit und es kann auch bis hin zum Tropfenmitriss in den Brüdenaustrag kommen. In beiden Fällen wird die Verweilzeit im Verdampferrohr verändert. Dadurch kann es zu einer Veränderung der Stoffeigenschaften und Konzentrationen im Gas und in der Flüssigkeit kommen, die üblicherweise die Produktqualität negativ beeinflusst. Diese Effekte können durch eine für die Aufgabe zugeschnittene Auslegung vermieden werden.

Hierbei ist auch besonders auf die Auswahl und eine geeignete Gestaltung des Aufgabesystems zu achten. Wird das Medium nicht gleichmäßig auf alle Rohre verteilt kann es in einigen Rohren zu trockenen Stellen kommen, in anderen zu überhöhter Flüssigkeitsbeladung. Dies ist für ein gleichmäßiges Produktionsergebnis unbedingt zu vermeiden. Je nach Anwendungsbereich und Anbieter ist eine breite Auswahl an Aufgabesystemen kommerziell erhältlich. Einige Aufgabesysteme sind beispielhaft in Abb. 2.3 nach [Scholl, 2006] dargestellt:

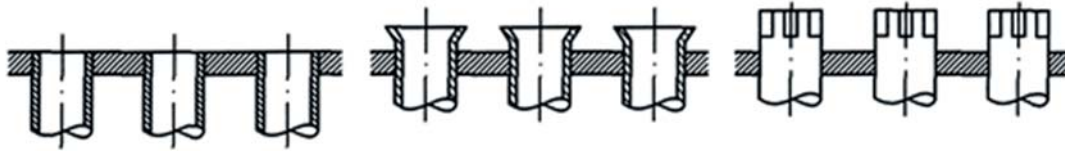


Abb. 2.3: Bauformen für Flüssigkeitsaufgaben bei Fallfilmverdampfern [Scholl, 2006]

Wird der Fallfilmverdampfer in einem Kolonnensumpf als Dampferzeuger genutzt, so sollte beim Design bereits geprüft werden, ob dieser mit getrenntem oder gemeinsamem Sumpf ausgeführt wird. Die beiden Varianten sind in Abb. 2.4 dargestellt und bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile.

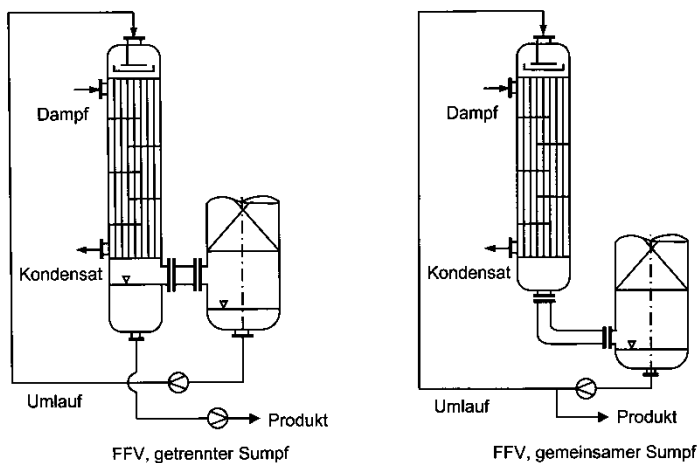


Abb. 2.4: Fallfilmverdampfer mit getrenntem und gemeinsamem Sumpf [Scholl, 2006]

Im getrennten Sumpf kann die Abtrennung von Stoffströmen oder die Bereitstellung von Dampf aus weitsiedenden Gemischen bei einer geringeren Temperatur erfolgen. Dies wird unter anderem genutzt, um die Heizdampftemperatur zu verringern und so ggf. auf vorhandene Wärmeströme zugreifen zu können (Wärmeintegration). Weiterhin liegt die Temperatur des aus dem Verdampfer ablaufenden Stromes im getrennten Sumpf deutlich unterhalb derer, die sich im Falle des gemeinsamen Sumpfes einstellen würde. Dies kann gerade bei temperaturempfindlichen Stoffen einen großen Vorteil für die Produktqualität und Ausbeute bedeuten, da so die thermische Belastung reduziert wird.

Nachteilig bei der Umsetzung mit getrenntem Sumpf ist vor allem der erhöhte apparative Aufwand. Hierbei ist besonders auf die Notwendigkeit einer weiteren Pumpe hinzuweisen. Daher ergibt sich für diese Bauweise ein erhöhter Kostenbedarf, dessen Notwendigkeit bereits bei der