

---

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Übersicht über den strukturellen Aufbau der vorliegenden Arbeit.....   | 3  |
| Abbildung 2-1: Schnittzeichnung eines Dünnschichtverdampfers mit Rollenwischern, Firma UIC GmbH (links) und Fließbilddarstellung mit angeschlossenem Kondensator (rechts).....  | 8  |
| Abbildung 2-2: Darstellung verschiedener Wischersysteme in Dünnschichtverdampfern. (A) Wischer mit festem wandabstand (System LuWa), (B) Rollenwischer, (C) pendelnd gelagerte Wischerelemente, (D) Wischer mit schabender Wirkung auf das verarbeitete Medium. ....  | 9  |
| Abbildung 2-3. Ansichten von Blockwischern (links) und Rollenwischern (rechts) in einem ähnlichen Format, wie sie auch in dieser Arbeit untersucht werden. Wischerelemente (1), Spritzschutz (2) und zylindrische Verdampferfläche (3), (Cvengroš et al., 2000).....  | 9  |
| Abbildung 2-4: Schematische Darstellung von Bugwelle (1), Spaltzone (2) und Filmzone (3) in einem Dünnschichtverdampfer, der mit einem Rollenwischer betrieben wird (Appelhaus et al., 2020).....   | 10 |
| Abbildung 2-5: Zusammenspiel zwischen apparativen, stofflichen und betrieblichen Einflussparametern und deren Auswirkungen bei der Verarbeitung problematischer Stoffe in Dünnschichtverdampfern (Jahnk'scher Kreis). Die Schriftgröße ist als Gewichtung dieses Faktors in Bezug auf seinen Einfluss zu verstehen. ....  | 11 |
| Abbildung 2-6: Unterscheidung möglicher Benetzungssituationen an einem von außen mit Wasser berieselten Rohr in Abhängigkeit von Sumpfumfangsbelastung und Wärmestromdichte (Stephan et al., 2020).....   | 18 |
| Abbildung 2-7: Wärmedurchgangskoeffizienten für verschiedene Betriebsbedingungen bei 1 bar (a) in Abhängigkeit der Wärmestromdichte nach (Kirschbaum and Dieter, 1958). 1000 kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C) entsprechen 1163 W/(m <sup>2</sup> ·K) und 10 kcal/(m <sup>2</sup> ·h) entsprechen 11,6 kW/m <sup>2</sup> .....  | 23 |
| Abbildung 2-8: Produktseitige Wärmeübergangskoeffizienten, hier als $h_p$ deklariert, in Abhängigkeit der Wischedrehzahl für verschiedene Zuckerlösungen (links) und Feedmassenströme einer 10-%-igen Zuckerlösung (rechts) aus (Stankiewicz and Rao, 1988). $t_s$ ist die Heizdampftemperatur (steam temperature). ....  | 26 |
| Abbildung 2-9: Erzielbare Wärmedurchgangskoeffizienten für starre Wischer mit normierten Wandabständen aus (Reay, 1963). 100 B.t.u./(h·ft <sup>2</sup> ·°F) entsprechen 568 W/(m <sup>2</sup> ·K) und 10 lb./h entsprechen 4,5 kg/h. ....   | 28 |
| Abbildung 3-1: Charakteristischer Zusammenhang zwischen Verdampfungskapazität und Berieselungsdichte für eine konstante treibende Temperaturdifferenz in Dünnschichtverdampfern zur Bewertung der Benetzungssituation.....  | 33 |
| Abbildung 3-2: Verläufe von Temperaturen und Flüssigkeitsbelastungen entlang der Verdampferwand für den Fall, dass ein unterkühlter Feed erwärmt und bis unter seine Mindestberieselungsdichte verdampft wird. ....   | 35 |
| Abbildung 3-3: Benetzungssituationen für einen unterkühlten Feed mit $T_s > T_{s,min}$ am Austritt bei der Verdampfung eines Reinstoffs und dem Einsatz von Heizdampf als betriebsmittel seitiges Medium... ...   | 37 |
| Abbildung 3-4: Benetzungssituationen für einen auf Siedetemperatur vorgewärmten Feed (Reinstoff), der bis unter seine Mindestberieselungsdichte eingedampft wird. Es liegen produktseitig nur die Zonen der Voll- und Teilbenetzung vor. Als Heizmedium ist hier Thermalöl dargestellt, dass überlicherweise im Gegenstrom zum dünnen Film geführt wird und keinem Phasenwechsel unterliegt. .... | 38 |
| Abbildung 3-5: Benetzungssituation bei der Reinstoffverdampfung für den Fall, dass der Feed flüssig siedend ist und die Verdampfung nur aus einem vollständig geschlossenen Film heraus ablaufen kann. Heizseitig wird in diesem Beispiel Dampf eingesetzt. ....  | 39 |

## Abbildungsverzeichnis

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 3-6: Aufbau des Gleichgewichtsstufenmodells, das nach dem Prinzip der offenen Verdampfung arbeitet und die Bewertung beliebiger Apparategeometrien ermöglicht. Beschreibung (v.l.n.r.): Höhenunterteilung; Stufenbestandteile bestehend aus einem Wärmeübertrager und einem Flash; Detailansicht einer Stufe; Beschreibung des Wärmedurchgangs in einer Stufe..... | 44 |
| Abbildung 3-7: Verschaltungsansichten in der Simulationsumgebung ChemCAD für die Kondensation von Heizdampf (links, von oben nach unten) und die Verwendung von Thermalöl (rechts, von unten nach oben), (Lais, 2019) .....  | 45 |
| Abbildung 3-8: Eingabemaske für die Input-Parameter des Fließbildmodells. Anpassbar sind alle grau hinterlegten Kennzahlen sowie die Auswahlfelder bezüglich Edelstahl / Glas, Wasserdampf / Öl und Stoffdatenursprung, aus (Lais, 2019).....  | 46 |
| Abbildung 4-1: Produktseitiges Fließbild der Versuchsanlage. ....  | 49 |
| Abbildung 4-2: Betriebsmittel seitiges Fließbild der Versuchsanlage. ....  | 50 |
| Abbildung 4-3: Foto der Versuchsanlage mit eingezeichneten Bauteilkomponenten sowie Darstellung der verwendeten Wischer (Blockwischer mit angewinkelten Kammelementen (links) und Rollenwischer (rechts)). ....  | 51 |
| Abbildung 4-4: Piktographische Darstellung der insgesamt drei untersuchten Dünnschichtverdampfer, unterteilt nach Wandmaterial (weiß = Borosilikatglas, schwarz = Edelstahl), Wischersystem (Rollen, Kamm oder starr), Beheizungsart (Thermaöl = Doppelmantel aufsteigend durchströmt, Heizdampf = absteigend durchströmt) und Baugröße (relative Größen zueinander). ....   | 54 |
| Abbildung 4-5: Bilanzraum des Dünnschichtverdampfers zur Aufstellung der betriebs- und produktseitigen Energiebilanz (links) und Bilanzraum des Kondensators (rechts). ....  | 56 |
| Abbildung 4-6: Betriebs- und produktseitiger Bilanzraum des Vorwärmers W2. ....  | 57 |
| Abbildung 4-7: Bilanzraum für die Gesamtanlage als offenes, stationäres System. ....   | 58 |
| Abbildung 4-8: Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera fokussiert auf die Verdampferfläche. Zu erkennen sind ein Rollenwischerelement (links) und Blockwischerelement (rechts) mit Abstandsmarkierungen von 1 cm Breite (schwarze radiale Striche auf dem Rollenelement). Beim Rollenwischer ist hier Strang 3 zu erkennen. ....  | 60 |
| Abbildung 4-9: Lokaler Entnetzungsmoment auf der eigentlich voll benetzten Verdampfungsfläche infolge einer zu geringen Flüssigkeitsbelastung. ....  | 60 |
| Abbildung 5-1: Ermittelte Massenströme für Feed ( $\Delta$ ), Sumpf ( $\circ$ ) und Destillat ( $x$ ) während eines typischen stationären Zustands über eine Haltedauer von 20 Minuten. Versuch V_bu3_TF100_17_375_15_21-08-19_13_26_46.....   | 62 |
| Abbildung 5-2: Einfluss der ausgeschalteten (links) und eingeschalteten (rechts) Abzugslüftung auf das Grundrauschen der Messwerte für Feed ( $\Delta$ ), Sumpf ( $\circ$ ) und Destillat ( $x$ ).....   | 63 |
| Abbildung 5-3: Gravimetrisch erfasste Massen von Feed ( $\Delta$ ), Sumpf ( $\circ$ ) und Destillat ( $x$ ) während eines typischen stationären Zustands über eine Haltedauer von 20 Minuten.....  | 64 |
| Abbildung 5-4: Aus den Rohdaten berechneter produkt- und betriebsmittel seitiger Wärmestrom am Kondensator W3 nach Gleichung 4-5 und 4-6.....  | 65 |
| Abbildung 5-5: Aus den Rohdaten berechneter produkt- und betriebsmittel seitiger Wärmestrom am Dünnschichtverdampfer nach den Gleichungen 4-3 und 4-4.....   | 65 |
| Abbildung 5-6: Brüdenter Temperatur und Prozessdruck während eines stationären Zustands zur Beurteilung der Anlagenstabilität.....   | 66 |
| Abbildung 5-7: Temperaturverläufe während der Aufzeichnung eines stationären Zustands.....   | 67 |
| Abbildung 5-8: Temperaturverläufe während der Aufzeichnung eines stationären Zustands. Der auffällige Verlauf von TIR204 ist auf das Prinzip der Kondensatauschleusung zurückzuführen. Hier fällt nur intervallweise Flüssigkeit an und wird erfasst. ....   | 68 |

## Abbildungsverzeichnis

---

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 5-9: Wischerdrehzahl während der Aufnahme des stationären Zustands, gezeigt anhand des Beispielversuchs. ....   | 68 |
| Abbildung 5-10: Paritätsdiagramm der Massenbilanz am Edelstahldünnschichtverdampfer und Fehlergrenzen von +/- 5 %. ....   | 69 |
| Abbildung 5-11: Paritätsdiagramm der Massenbilanz am Glasdünnschichtverdampfer und Fehlergrenzen von +/- 5 %. ....  | 69 |
| Abbildung 5-12: Maximal erzielbare Verdampfungskapazitäten bei der Verdampfung von Monoethylenglykol bei 21 mbar bei unterschiedlichen treibenden Temperaturdifferenzen bei Verwendung des <b>Rollenwischers</b> und einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,57 m/s. ....  | 71 |
| Abbildung 5-13: Maximale erzielbare Verdampfungskapazitäten bei der Verdampfung von MEG bei 21 mbar bei unterschiedlichen treibenden Temperaturdifferenzen beim Einsatz des <b>Blockwischers</b> und einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,57 m/s. ....  | 72 |
| Abbildung 5-14: Sumpfumfangsbelastungen in Abhängigkeit von Berieselungsdichte und treibender Temperaturdifferenz beim Verdampfen von MEG bei 21 mbar und einer Umfangsgeschwindigkeit des <b>Blockwischers</b> von 1,57 m/s. ....  | 73 |
| Abbildung 5-15: Wärmedurchgangskoeffizienten im Bereich der vollständigen Benetzung beim Einsatz von <b>Blockwischern</b> und einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,57 m/s für unterschiedliche treibende Temperaturdifferenzen am dampfbeheizten Edelstahl-DSV. Verdampfung von MEG bei 21 mbar. ....   | 75 |
| Abbildung 5-16: Wärmedurchgangskoeffizienten im Bereich der vollständigen Benetzung beim Einsatz von <b>Rollenwischern</b> und einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,57 m/s für unterschiedliche treibende Temperaturdifferenzen am dampfbeheizten Edelstahl-DSV. Verdampft wird MEG bei 21 mbar. ....   | 76 |
| Abbildung 5-17: Angepasste Verdampfungskapazitäten bei der Verarbeitung von MEG, das 10 K unterkühlt in den Dünnschichtverdampfer eintritt (Jahnke et al., 2020), beim Einsatz des Blockwischers und einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,57 m/s. ....  | 77 |
| Abbildung 5-18: Resultierender Anteil an einphasiger Aufheizfläche bezogen auf die Gesamtfläche mit 10 K unterkühltem MEG (angepasst aus (Jahnke et al., 2020)). ....   | 78 |
| Abbildung 5-19: Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit der Berieselungsdichte im Bereich der Voll- und Teilbenetzung bei der Verdampfung von MEG bei 21 mbar im Edelstahldünnschichtverdampfer und dem Einsatz von Blockwischern bei 1,57 m/s Umfangsgeschwindigkeit, angepasst aus (Jahnke et al., 2020). ....   | 79 |
| Abbildung 5-20: Minimale Sumpfumfangsbelastungen in Abhängigkeit der treibenden Temperaturdifferenz, die für die vollständige Benetzung der Verdampferfläche notwendig sind. Verdampft wurde MEG bei 21 mbar und einer Wischerumfangsgeschwindigkeit (Blockwischer) von 1,57 m/s (Jahnke et al., 2020). ....  | 79 |
| Abbildung 5-21: Flächenanteil, der eine vollständig benetzte Verdampfungsfläche kennzeichnet, in Abhängigkeit von treibender Temperaturdifferenz und Berieselungsdichte. ....   | 81 |
| Abbildung 5-22: Einfluss der Wischerumfangsgeschwindigkeit beim Einsatz von Blockwischern auf die Ausbildung der verschiedenen Benetzungssituationen für unterschiedliche treibende Temperaturdifferenzen im Edelstahldünnschichtverdampfer. Als Versuchsmedium wird MEG bei 21 mbar verdampft. Die Vorwärmung beträgt $T_{F,ein} = 90^\circ\text{C}$ und liegt damit 10 K unterhalb der Siedetemperatur von reinem MEG. .... | 82 |
| Abbildung 5-23: Einfluss der Wischerumfangsgeschwindigkeit beim Einsatz von Blockwischern auf die Ausbildung der verschiedenen Benetzungssituationen bei einer treibenden Temperaturdifferenz von $\Delta T = 20\text{ K}$ in einem Dünnschichtverdampfer. Als Versuchsmedium wird MEG bei 21 mbar (a) verdampft. Die Vorwärmung beträgt $T_{F,ein} = 100^\circ\text{C}$ und ist damit flüssig siedend. ....                  | 84 |

## Abbildungsverzeichnis

---

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 5-24: Erzielbare Verdampfungsleistung in einem Dünnschichtverdampfer bei unterschiedlich vorgeheizten Feedmassenströmen bei konstanter treibender Temperaturdifferenz ( $\Delta T = 20$ K) und unter dem Einsatz von Blockwischern ( $n = 1,57$ m/s), MEG bei 21 mbar. ....  | 85  |
| Abbildung 5-25: Verdampfungskapazität in Abhängigkeit der Berieselungsdichte bei unterschiedlichen $\Delta T$ 's während der Verdampfung von Wasser bei 1 bar (a) mit dem <b>Blockwischer</b> bei einer Wischerumdrehung von 300 U/min und einer Feedvorwärmung von $T_F = 80$ °C, d.h. einer Unterkühlung von ca. 20 K.....   | 87  |
| Abbildung 5-26: Verdampfungskapazität in Abhängigkeit der Berieselungsdichte bei einem $\Delta T = 10$ K während der Verdampfung von Wasser bei 1 bar a mit dem <b>Rollenwischer</b> bei einer Wischerumdrehung von 300 U/min und einer Feedvorwärmung von $T_F = 80$ °C. ....   | 88  |
| Abbildung 5-27: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung von Versuch 1_15_b_3s. Eingezeichnet ist die Kante eines sich zurückziehenden Flüssigkeitsteppichs aufgrund des Kontaktwinkelgleichgewichts in Richtung des oberen Bildausschnitts entgegen der Schwerkraft.....  | 89  |
| Abbildung 5-28: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung von Versuch 9_10_b_4s. Rot eingezeichnet sind überlagernde Wellen, die im gleichen Winkel wie die Profilierung des Blockwischers über die Verdampferfläche strömen. Der helle Bereich rechts zeigt das Ende des Blockwischers. ....   | 90  |
| Abbildung 5-29: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung von Versuch 8_20_b_0,5s. In Rot gekennzeichnet sind (tatsächlich) <b>trockene Stellen</b> , die bei einer Berieselungsdichte von 31 L/(m·h), laut Benetzungssituation, eigentlich nicht erwartet werden (vgl. Abb. 4-25).....   | 91  |
| Abbildung 5-30: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung von Versuch 2_20_b_19s. In Rot gekennzeichnet sind <b>benetzte Stellen</b> .....  | 92  |
| Abbildung 5-31: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung von Versuch 2_10_r_12s. In Rot markiert sind die benetzten Stellen unmittelbar nach Eingriff des Rollenwischers. ....   | 92  |
| Abbildung 5-32: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung von Versuch 7_10_r_17s. Eine vollständige Benetzung liegt ohne Keimstellen oder Indizien für einen Entnetzungsvorgang vor. ....   | 93  |
| Abbildung 5-33: Erzielbare Verdampfungskapazitäten in Abhängigkeit der Berieselungsdichte bei unterschiedlichen treibenden Temperaturdifferenzen und Wischerumfangsgeschwindigkeiten ( $\diamond 0,62$ m/s, $\circ 0,8$ m/s, $x 1$ m/s) am Glas-Dünnschichtverdampfer unter dem Einsatz von Blockwischern und Monoethylenglykol bei einem Prozessdruck von 10 mbar. .... | 95  |
| Abbildung 5-34: Einfluss des Wischertyps (Rollen- oder Kammwischer) auf die Verdampfungskapazität im untersuchten Betriebsbereich bei einer Wischerumfangsgeschwindigkeit von 1 m/s. ....  | 96  |
| Abbildung 5-35: Einfluss der Wischerumfangsgeschwindigkeit auf die Verdampfungskapazität im untersuchten Betriebsbereich ( $\diamond 0,62$ m/s, $\circ 0,8$ m/s, $x 1$ m/s, $\square 1,17$ m/s) beim Einsatz von Rollenwischern. ....  | 97  |
| Abbildung 5-36: Verdampfungskapazitäten in Abhängigkeit der Berieselungsdichte bei unterschiedlichen treibenden Temperaturdifferenzen an einem Dünnschichtverdampfer im Produktionsmaßstab bei der Verdampfung von Wasser bei einer konstanten Wischerumfangsgeschwindigkeit. Verwendet wurde ein Wischer mit konstantem Wandabstand. ....                               | 99  |
| Abbildung 5-37: Beiträge zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten sowie k-Wert selbst entlang der unterschiedlichen Höhensegmente. Simulationsergebnisse am Edelstahldünnschichtverdampfer bei einer treibenden Temperaturdifferenz von $\Delta T = 10$ K, 21 mbar sowie 1,57 m/s Wischerumfangsgeschwindigkeit. ....   | 101 |
| Abbildung 5-38: Massenströme entlang der unterschiedlichen Höhensegmente. Simulationsergebnisse am Edelstahldünnschichtverdampfer bei einer treibenden Temperaturdifferenz von $\Delta T = 10$ K, 21 mbar sowie 1,57 m/s Wischerumfangsgeschwindigkeit. ....   | 102 |

## Abbildungsverzeichnis

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 5-39: Simulationsergebnisse der Temperaturverläufe von Heiz- und Produktseite für den Beispielversuchs. ....  | 103 |
| Abbildung 5-40: Simulationsergebnisse des prozentualen Flächenanteils zur einphasigen Aufwärmung bei einem um 10 K unterkühlten Feedmassenstrom. ....   | 104 |
| Abbildung 5-41: Vergleich von experimentellen und simulativen Versuchen am Edelstahldünnenschichtverdampfer bei der Verdampfung von MEG bei 21 mbar und dem Einsatz des Blockwischers bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,57 m/s. .... | 105 |

---

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 2-1: Überblick über untersuchte Dünnschichtverdampfer, Geometrien, Betriebsparameter und dem Forschungsschwerpunkt (H = gewischte Länge).....   | 30 |
| Tabelle 3-1: Mögliche <i>modi operandi</i> und deren Einfluss auf die Benetzungssituationen im Verdampfer. ....   | 34 |
| Tabelle 4-1: Betriebsbedingungen und wesentliche Stoffeigenschaften der durchgeführten Versuche am Edelstahldünnschichtverdampfer im Technikumsmaßstab.....   | 52 |
| Tabelle 4-2: Übersicht über apparative, stoffliche und betriebliche Gegebenheiten der untersuchten Dünnschichtverdampfer im Vergleich. ....   | 53 |
| Tabelle 4-3: Messunsicherheiten der einzelnen Messgeräte laut Herstellerangaben.....  | 58 |
| Tabelle 5-1: Minimale Sumpfumfangsbelastungen in Abhängigkeit der treibenden Temperaturdifferenz beim Einsatz des Rollenwischers abgeleitet aus Abbildung 5-12.....   | 71 |
| Tabelle 5-2: Minimale Sumpfumfangsbelastungen in Abhängigkeit der treibenden Temperaturdifferenz beim Einsatz des Blockwischers abgeleitet aus Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14. Ebenfalls angegeben ist die korrespondierende Berieselungsdichte. ....  | 74 |
| Tabelle 5-3: Rechnerische Bestimmung der einphasigen Aufheizflächen und Vergleich mit der vorherrschenden Verdampfungskapazität auf der verbleibenden Verdampfungsfläche. Verwendet wurden jeweils die drei höchsten Feedbelastungen für die Feedeintrittstemperaturen von 75 °C und 50 °C aus Abbildung 5-24. .... | 85 |
| Tabelle 5-4: Kontaktwinkel von MEG und Wasser auf Glas oder Edelstahl (Mittal, 2019). ....  | 98 |

---

# 1 Einleitung

In Zeiten von raschen Produktentwicklungen und verkürzten Produktionsdauern, gerade im Bereich der Spezialchemie, ändern sich die Anforderungen an die einzelnen verfahrenstechnischen Grundoperationen in Richtung flexibler, modularer Mehrzweck- und Mehrproduktanlagen. Bei der thermischen Aufreinigung von Medien mit herausfordernden Stoffeigenschaften, wie thermischer Instabilität oder hoher Viskosität, kommt dem Dünnschichtverdampfer eine besondere Bedeutung zu. Die für eine effiziente Verdampfung notwendige und erforderliche vollständige Benetzung der Wärmeübertragungsfläche ist von einer Vielzahl stofflicher, betrieblicher und apparativer Faktoren abhängig. Der adaptive Betrieb dieser Apparate soll durch eine übergreifende, segmentweise Methodik gesichert werden, die im Rahmen dieser Arbeit etabliert und an unterschiedlichen Apparateskalen validiert wird.

Der Forderung nach produktschonenden Prozessbedingungen, um beispielsweise Wirkstoffe, Vitamine, Aromaten oder Öle vor der thermischen Zersetzung zu schützen, wird oft durch das Herabsetzen des Prozessdrucks, und damit einhergehend der Siedetemperatur, nachgekommen. Ist außerdem eine möglichst kurze Verweilzeit erforderlich, kann dies durch einen geringen Flüssigkeitsinhalt, wie er bei Fallfilmverdampfern vorkommt, realisiert werden. Herausfordernde Produkteigenschaften, wie eine vergleichsweise hohe Viskosität oder eine Neigung zum Fouling oder Schäumen, führen dazu, dass der Flüssigkeitsfilm ergänzend mechanisch beeinflusst werden muss.

**Dünnschichtverdampfer (DSV)** sind Spezialapparate der thermischen Verfahrenstechnik, die den oben genannten Umständen gerecht werden. Das Alleinstellungsmerkmal ist der mechanisch beeinflusste Flüssigkeitsfilm, der auf der Innenseite eines beheizten Rohres hinabströmt und durch ein in den Film eingreifendes Wischersystem erzeugt und möglichst lange aufrechterhalten wird. Durch zugeführte Wärme verdampft ein Teil des Zulaufs und wird am Kopf des Apparats als Brüden abgeführt, extern kondensiert und als Destillat gewonnen. Durch das Funktionsprinzip und die damit verbundenen Vorteile – vor allem bei der Verarbeitung von höchst problematischen Produkten – werden DSV bei Anwendungen mit o.g. Rahmenbedingungen, gegenüber den meisten anderen Verdampfern bevorzugt oder stellen die einzige Option dar (Glover and Hyde, 1997; Goedecke, 2006; Kaiser and Kranz, 1999).

Eine vollständige Benetzung der Verdampferfläche ist sicherzustellen, um die Verdampfungsleistung dieser Apparate bestmöglich auszunutzen. Dazu ist die Kenntnis von Mindestberieselungsdichten, also der ausreichenden lokalen Flüssigkeitsbelastung pro Umfang, essenziell. Ist diese zu gering, besteht die Gefahr der Entnetzung und des Filmaufrisses. Ist diese zu hoch kann es zu einem Fluten des Apparats kommen. Es existieren zahlreiche stoffliche, apparative und operative Einflussfaktoren, die sich auf das Benetzungsverhalten und die Verdampferkapazität auswirken. Die Einflussfaktoren führen zu Veränderungen des Verweilzeitverhaltens, der Filmdicken und -zonen, der erreichbaren Trennleistung oder des lokalen Wärmeübergangs. Diese Bereiche werden seit den 1950er Jahren erforscht (Dieter, 1958; Schneider, 1955). Allerdings unterliegen die Erkenntnisse stets einer begrenzten Übertragbarkeit oder sind widersprüchlich (Kaiser and Kranz, 1999; Schaal et al., 2008; Skocylas and Dziak, 1990).

Eine rein rechnerische Auslegung der Apparate ist aufgrund von unbekannten Stoffeigenschaften neuer Produkte häufig nicht möglich und belastbare Wärmedurchgangskoeffizienten sind unbekannt. Werden sie zu konservativ angenommen, sind überdimensionierte Apparate und eine Verschlechterung der Benetzbarkeit die Folge. Die Umstellung von klassischen Batch-Verfahren auf eine kontinuierliche Betriebsweise für eine energie- und ressourceneffiziente Produktion trägt dazu bei, dass die Nachfrage nach modularen, flexiblen Mehrzweck- und Mehrproduktanlagen steigt (Hohmann et al., 2018). Hinzu kommt, dass die Übertragbarkeit der bekannten Einstellungen auf neue Produktgruppen gesichert sein muss. Im Bereich der Spezialchemie handelt es sich um innovative Produktgruppen mit teils unzureichend erforschten Eigenschaften. Nichtsdestotrotz muss das Produkt in den Markt eingeführt werden. Die Produktionszyklen und Prozessrouten sind vergleichsweise kurz. Zudem führt die Forderung nach verkürzten time-to-market Zeiten dazu, dass zeitintensive Labor- und Technikumsversuche, z. B. bei Lohndestillateuren, reduziert werden müssen (Riese et al., 2020).

Oft sind Dünnschichtverdampfer aber auch schon seit Jahrzehnten in Labor-, Technikums- und Produktionshallen in Betrieb und werden in einem engen Prozessfenster betrieben, da kaum Berechnungsgrundlagen bekannt oder vorhanden sind. Bei einem Produktwechsel liegt unter Umständen der neue Betriebspunkt sowohl aus operativer, aber auch aus wirtschaftlicher Sicht in einem ungünstigen Betriebsbereich und die Leistungsfähigkeit des Apparats wird nicht voll ausgenutzt (Lopez-Toledo, 2006).

Eine zusammenhängende und übertragbare Charakterisierungsgrundlage, die eine Bewertung und Übertragung bestehender Dünnschichtverdampfer ermöglicht, liegt in der Literatur bisher nicht vor. Hier setzt die vorliegende wissenschaftliche Abhandlung an.

An verschiedenen Verdampferausführungen werden der Einfluss von Feedzustand, Verdampfergröße, Wandmaterial, Wischersystem und Beheizungsart, auf das Benetzungsverhalten und die Verdampfungsleistung analysiert. Die genannten Umstände werfen die Frage auf, was spezifische Betriebscharakteristiken, aber auch verbindende Elemente zwischen verschiedenen Apparateausführungen sind, wie diese beschrieben werden können und inwiefern diese den Last- und Betriebsbereich, gerade im Hinblick auf die Benetzbarkeit und die Verdampfungsleistung, eingrenzen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf einen dampfbeheizten Dünnschichtverdampfer mit zwei verschiedenen Wischersystemen im Technikumsmaßstab gelegt. Dieser wird stofflich und energetisch bilanziert und anhand der Flüssigkeitsbeaufschlagung, Wischedrehzahl beziehungsweise -art, Feedvorwärmung sowie Heizmanteltemperatur charakterisiert. Als Bewertungswerkzeug wird eine segmentweise Methodik entwickelt, die es ermöglicht, verschiedene Benetzungszonen entlang des Verdampfungsweges aus den experimentellen Daten zu extrahieren. Ebenfalls wird untersucht, wie sich die Benetzungszonen und die Verdampfungsleistung beim Scale-Up auf verschiedene Apparatedesigns verschieben. Unterstützt werden die Erkenntnisse durch eine Fließbildsimulation, die nach dem Prinzip der offenen Verdampfung arbeitet. Damit wird unterstrichen, bis wohin die segmentweise Methodik genug Aufschluss über das Apparateverhalten gibt und ab wann ein tiefergreifender Blick nur über Modell und Simulation funktionieren kann, vgl. Abbildung 1-1.

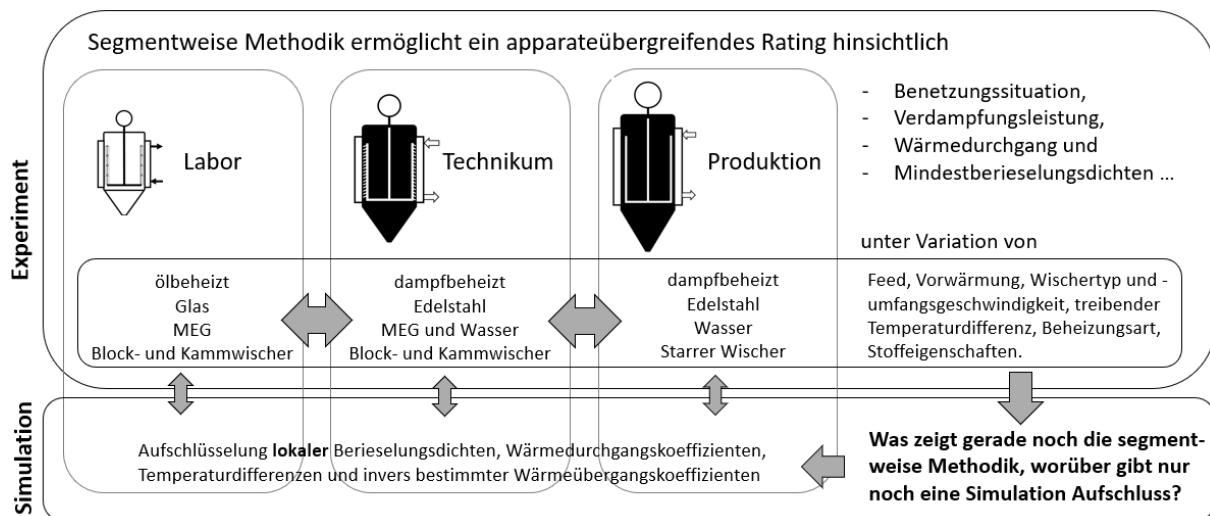


Abbildung 1-1: Übersicht über den strukturellen Aufbau der vorliegenden Arbeit.

Die verschiedenen Benetzungssituationen können aus den experimentellen Datensätzen bestimmt, deren Effekte gewichtet und die auftretenden Charakteristiken an unterschiedlichen Apparategrößen und Wischersystemen verglichen werden. Dabei spielt vor allem die Änderung der Umfangsbelastung im Dünnschichtverdampfer mit fortschreitender Fließrichtung in Richtung Sumpfaustritt eine entscheidende Rolle. Anhand der sich einstellenden Brüdenleistung können der Benetzungszustand und die Position der Teilentnetzung bestimmt werden. Bekanntermaßen liegen bei Fallfilmen die Verdampfungsmechanismen Oberflächensieden oder Blasensieden vor (Scholl, 2010; Stephan, 1992). Ein Vergleich mit der wirkenden Wärmestromdichte hilft dabei, die Verdampfungsmechanismen und deren

## 1. Einleitung

---

Auswirkungen auf die Benetzbartigkeit zu quantifizieren. Unterstützt durch Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bei geöffnetem Sumpfaustrag werden Entnetzungsphänomene beschrieben und die Unterschiede bei Verwendung verschiedener Wischer herausgestellt.

Neben der für eine vollständige Benetzung erforderlichen Mindestberieselungsdichte und der sich einstellenden Fluiddynamik des gewischten Films sind die Verdampfungsleistung und die erzielbaren Wärmedurchgangskoeffizienten in den einzelnen Teilbereichen von Interesse. Um dies nicht nur aus den experimentellen Daten abzuleiten, sondern auch modellieren zu können, wird der Apparat im Fließbildmodell höhendiskretisiert. Mit bekannten Korrelationen für Heiz- und Produktseite werden die Beiträge am Wärmewiderstand bestimmt. Schlussendlich liefern die Erkenntnisse dieser Arbeit eine bedarfsgerechte Berechnungs- und Bewertungsmethodik, die im Hinblick auf modularisierte Grundoperationen innerhalb der Verfahrenstechnik die Anforderungen der produzierenden Industrie bei richtiger Anwendung ermöglicht.