



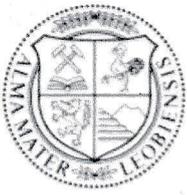
Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes

Masterarbeit

Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen
und Stoffübergangskoeffizienten
geordneter Packungen

Michael Baumfrisch, BSc

November 2022



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 03.11.2022



Unterschrift Verfasser/in
Michael Baumfrisch

Danksagung

Hiermit spreche ich meinen herzlichen Dank

den Herren

Dipl.-Ing. Marcus Schlager, Dipl.-Ing. Georg Haushofer,
Mark Read, Fritz Kittinger und Florian Schilling

für die konstruktive Zusammenarbeit,

Herrn Dominik Berger und Herrn Rudolf Eggerer

für Ihre dienlichen Beiträge zu dieser Arbeit

sowie

meiner Familie

für Ihre stetige Unterstützung

aus.

Ich wünsche allen Unterstützern dieser Masterarbeit in Ihrem Wirken weiterhin Erfolg.

Kurzfassung

Gepackte Absorptionskolonnen werden in zahlreichen industriellen Anwendung eingesetzt. Zur Auslegung und Modellierung dieser Apparate ist die Kenntnis der Stofftransportparameter (effektive Phasengrenzflächen a_e , sowie flüssigkeitsseitige und gaseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} und k_{Ga_e}) der verwendeten Packungen erforderlich. Untersuchungen zur Bestimmung dieser Parameter an großen Versuchsständen im Pilotmaßstab sind mit hohem Investitions- und Betriebsaufwand verbunden. Durch Bestimmung der Stofftransportparameter an Anlagen im kleineren Technikumsmaßstab mit geeigneter Extrapolation auf das Verhalten der Packungen in Anlagen größeren Durchmessers besteht daher großes Einsparungspotential.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden an zwei Versuchsständen unterschiedlichen Kolonneninnendurchmessers (150 und 422 mm) Messverfahren mit geeigneten Stoffsystemen zur Bestimmung der erwähnten Stofftransportparameter implementiert. Diese sind die Absorption von CO_2 oder SO_2 aus Luft in Natronlauge (Bestimmung von a_e , resp. k_{Ga_e}) und die Desorption von CO_2 aus Wasser (Bestimmung von k_{La_e}).

Mittels dieser Messverfahren wurden vier Packungsgeometrien an beiden Versuchsständen charakterisiert. Eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse mit Literaturdaten hat die Vergleichbarkeit eigener Messungen mit anderen Forschungsgruppen gezeigt. Danach wurden die unterschiedlichen Packungsgeometrien basierend auf ermittelten Stofftransportparametern untereinander verglichen. Schließlich erfolgte eine anlagenübergreifende Beurteilung auf Abweichungen. Betreffend der effektiven Phasengrenzflächen a_e sind am kleineren Versuchsstand im Vergleich zum größeren negative Abweichungen von bis zu 25 % aufgetreten. Ermittelte gaseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten k_{Ga_e} sind am größeren Versuchsstand geringfügig erhöht. Ausgehend von den Versuchsergebnissen zu flüssigkeitsseitigen volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} ist kein eindeutiger Einfluss des Kolonnendurchmessers festzustellen.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit stellen einen Beitrag zum besseren Verständnis des Kolonnendurchmesser-Einflusses auf ermittelte Stofftransportparameter dar. Im Rahmen dieser Arbeit generierte Versuchsdaten der untersuchten Packungen können zusätzlich zur Auslegung und Modellierung von Kolonnen dienen.

Abstract

Packed absorption columns are used in numerous industrial applications. For the design and modelling of these apparatuses, knowledge of mass transfer properties (effective interfacial area a_e , as well as liquid-side and gas-side volumetric mass transfer coefficients $k_L a_e$ and $k_G a_e$) of used packings is required. The experimental determination of these parameters at large test rigs is associated with high investment and operating costs. The ability to accurately extrapolate parameters determined at small plants to plants of larger scale would therefore be of great economical interest.

In this work, measurement methods for the determination of mass transfer properties were implemented using suitable mass transfer systems at two test rigs of different column diameters (ID 150 and 422 mm). These are the absorption of CO₂ or SO₂ from air into solutions of sodium hydroxide in order to determine a_e , respectively $k_G a_e$, and the desorption of CO₂ from water for the determination of $k_L a_e$.

By utilising these methods of measurement, four packing geometries were characterized at both test rigs. A comparison of experimental results to literature data demonstrated the comparability of own measurements to those of other researchers. Afterwards the different packing geometries were compared to each other based on determined mass transfer properties. Ultimately, a cross-plant evaluation regarding deviations was carried out. Concerning interfacial areas a_e , negative deviations up to 25 % occurred at the smaller test rig in relation to the larger one. Gas-side volumetric mass transfer coefficients $k_G a_e$ are slightly increased for packings examined at the larger test rig. Regarding the experimental results of liquid-side volumetric mass transfer coefficients $k_L a_e$, no clear influence of column diameter can be determined.

The findings of this work on the effect of column diameter represent a contribution to mass transfer parameter determination at small test rigs. Additionally, experimental data generated in this work may be used for design and simulation of columns using the examined packings.

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|-----------|
| 1 EINLEITUNG..... | 3 |
| 1.1 Problemstellung | 5 |
| 1.2 Zielsetzung..... | 5 |
| 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN | 6 |
| 2.1 Grundlagen zu Packungskolonnen..... | 6 |
| 2.2 Beschreibung von Ab-/Desorptionsvorgängen | 9 |
| 2.3 Empirische Berechnungsformeln für Stofftransportparameter | 14 |
| 3 MATERIAL UND METHODEN..... | 16 |
| 3.1 Versuchsstände | 16 |
| 3.1.1 Aufbau..... | 17 |
| 3.1.2 Einrichtungen zur Messgas- und Flüssigkeitsprobenentnahme | 19 |
| 3.1.3 Messtechnik..... | 20 |
| 3.2 Untersuchte Packungsgeometrien | 22 |
| 3.3 Angewandte Messverfahren..... | 26 |
| 3.3.1 Messverfahren zur Bestimmung von a_e | 26 |
| 3.3.2 Messverfahren zur Bestimmung von $k_L a_e$ | 27 |
| 3.3.3 Messverfahren zur Bestimmung von $k_G a_e$ | 27 |
| 3.4 Versuchsdurchführung..... | 27 |
| 3.4.1 Versuche zur Bestimmung von a_e | 29 |
| 3.4.2 Versuche zur Bestimmung von $k_L a_e$ | 31 |
| 3.4.3 Versuche zur Bestimmung von $k_G a_e$ | 36 |
| 3.5 Versuchsdanenauswertung..... | 38 |
| 3.5.1 Effektive Phasengrenzflächen a_e | 38 |
| 3.5.2 Flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ | 41 |
| 3.5.3 Gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$ | 42 |
| 3.5.4 Vergleich von Versuchsergebnissen | 43 |
| 4 ERGEBNISSE..... | 44 |
| 4.1 Fluidynamische Parameter | 45 |
| 4.2 Effektive Phasengrenzflächen a_e | 46 |
| 4.3 Flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ | 52 |
| 4.4 Gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$ | 56 |
| 4.5 Vergleich von Packungsgeometrien..... | 61 |
| 4.6 Vergleich zwischen Versuchsständen | 63 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5 | DISKUSSION DER ERGEBNISSE..... | 64 |
| 5.1 | Effektive Phasengrenzflächen a_e | 64 |
| 5.2 | Flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ | 66 |
| 5.3 | Gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$ | 67 |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG..... | 69 |
| 6.1 | Ausblick..... | 70 |
| 7 | VERZEICHNISSE | 71 |
| 7.1 | Symbolverzeichnis..... | 71 |
| 7.2 | Literaturverzeichnis | 73 |
| 7.3 | Tabellenverzeichnis | 78 |
| 7.4 | Abbildungsverzeichnis..... | 79 |
| 8 | ANHANG | I |
| Anhang A: | Fotodokumentation untersuchter Packungen..... | I |
| Anhang B: | Versuchsdaten zu fluiddynamischen Eigenschaften $\Delta p/Z$ und h_L | I |
| Anhang C: | Versuchsdaten zu effektiven Phasengrenzflächen a_e | XV |
| Anhang D: | Versuchsdaten zu flüssigkeitsseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$... | XVII |
| Anhang E: | Versuchsdaten zu gasseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$ | XX |

1 Einleitung

Das Trennen von Stoffgemischen ist ein bedeutendes Feld der Verfahrenstechnik. Bei thermischen Trennvorgängen werden hierzu Abweichungen vom Gleichgewicht genutzt, welche Ausgleichsvorgänge über Konzentrations- oder Temperaturgefälle hervorrufen [1, 2]. Trennverfahren der thermischen Verfahrenstechnik sind beispielsweise Destillation, Absorption, Extraktion, Trocknung oder Kristallisation [2].

Im Fokus dieser Arbeit stehen Absorptionsprozesse. Darunter versteht man die Aufnahme gasförmiger Stoffe entsprechend ihrer Löslichkeit in einer Flüssigkeit [1]. Den Umkehrprozess, das Freisetzen eines gelösten Stoffes in die Gasphase, nennt man Desorption [3].

Industrielle Absorptionsprozesse werden meist in als Kolonnen ausgeführten Gas/Flüssigkeits-Kontaktapparaten durchgeführt. Das Innere dieser Apparate kann je nach Trennaufgabe in geeigneter Weise ausgeführt werden. Neben den Bauformen als Sprühkolonnen, Bodenkolonnen und Blasensäulen werden bei Absorption häufig auch Packungskolonnen eingesetzt [3]. In Packungskolonnen dienen sogenannte geordnete Packungen als phasengrenzflächenvergrößernde Einbauten zur Herstellung eines stetigen Phasenkontakts [2]. Geordnete Packungen werden bereits seit den 1960er-Jahren erfolgreich eingesetzt [4]. Beispielsweise wurde 1964 die Gewebepackung „BX“ von Sulzer erstmalig der Fachwelt vorgestellt [5]. Inzwischen gibt es für zahlreiche Anwendungen optimierte Packungsgeometrien aus beispielsweise dünnen Blechen, Kunststoff oder Keramik.

Zur Absorption von Wert- oder Schadstoffen aus Gasströmen gibt es eine Vielfalt an Anwendungen in welchen auch Packungskolonnen einsetzbar sind. Diesbezüglich sind nachfolgend einige Beispiele angeführt. Ein häufig angewandtes Verfahren ist die Aminwäsche. Dieses nutzt je nach Trennaufgabe geeignete Aminoalkohol-Lösungen zur Abtrennung von vorwiegend CO_2 und H_2S [6]. Für die Abtrennung hoher CO_2 -Konzentration bei hohen Temperaturen ist heiße Kaliumcarbonat-Lösung als Waschflüssigkeit besser geeignet (Benfield-Verfahren) [6]. Eine Laugenwäsche mit NaOH - oder KOH -Lösungen ist zur Restabtrennung geringer Konzentrationen an CO_2 , H_2S und Thiolen zweckmäßig [6]. Packungskolonnen werden auch zur Absorptionstrocknung von Erdgas mit Triethylenglykol eingesetzt [7]. Als weiteres Anwendungsbeispiel ist die Absorption von Ammoniak aus Abgas in verdünnter Schwefelsäure zu nennen, wobei eine als Flüssigdünger verwertbare Ammoniumsulfat-Lösung gewonnen wird [8]. Absorptionskolonnen finden auch im letzten Teilschritt des Ostwald-Verfahrens zur Herstellung von Salpetersäure Anwendung. Dabei werden Stickoxide aus der Verbrennung von Ammoniak in Wasser absorbiert, wodurch verdünnte Salpetersäure entsteht [9]. In verschiedenen Absorptionsverfahren (e.g. Selexol, Purisol, Rectisol, Sulfinol) eingesetzte organische Lösungsmittel sind zur Abtrennung hoher Konzentrationen saurer Gase wie CO_2 und H_2S wirtschaftlich sinnvoll, da eine Lösungsmittelregeneration bereits durch bloße Entspannung möglich ist [6]. Zur Entfernung von insbesondere SO_2 mithilfe eines organischen Lösungsmittels ist das Solinox-Verfahren zu nennen [6]. Schwefeldioxid ist außerdem mit Wasserstoffperoxid in Absorptionskolonnen zu Schwefelsäure definierter Konzentration umsetzbar [8].

Kriterien zur Auswahl geeigneter Packungsgeometrien können in den erwähnten Anwendungen neben der Trennleistung auch deren Anschaffungskosten oder Betriebskosten sein. Für niedrige Betriebskosten sollten eingebaute Packungen einen möglichst geringen Druckverlust bewirken. Entwicklungen von Packungsgeometrien dienen zum Zweck einer optimierten Trennleistung und Kosteneffizienz sowie der Erweiterung des möglichen Anwendungsspektrums von Packungen.

Die Entwicklung von Kolonnenpackungen beinhaltet experimentelle Untersuchungen des fluiddynamischen Verhaltens und der sogenannten Stofftransportparameter. Diese Eigenschaften sind auch für die Modellierung und Planung von Packungskolonnen wesentlich. Im Laufe der Zeit wurden von diversen Arbeitsgruppen geeignete Methoden zur Bestimmung dieser Packungseigenschaften erarbeitet. Um eine zuverlässige Vergleichbarkeit experimentell ermittelter Stofftransportparameter zu ermöglichen, empfehlen Hoffman et al (2007) [10] und Rejl et al (2009) [11] die Verwendung von standardisierten Stoffsystemen und Versuchsbedingungen. Empfehlungen dieser Arbeiten sind unter anderem in einer Übersichtsarbeit von Hegely et al (2017) [12] veröffentlicht. Die erwähnten Werke haben zusammen mit anderen Eingang in eine VDI-Richtlinie (VDI 2761, Blatt 2) [13] gefunden, womit seit 2020 erstmals ein Leitfaden standardisierter Absorptionsmethoden zur Stofftransportparameter-Bestimmung von Packungen verfügbar ist.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Implementierung und Anwendung von Messverfahren zur Bestimmung von Stofftransportparametern geordneter Metallpackungen an zwei Versuchseinrichtungen unterschiedlicher Größe der Montanuniversität Leoben. Diesbezügliche Versuche sind aufwändig. Daher wäre eine kostensparende Durchführung an Versuchseinrichtungen mit kleinem Kolonnendurchmesser und übertragbaren Ergebnissen wünschenswert.

1.1 Problemstellung

Die experimentelle Charakterisierung von Packungen ist einerseits ein wesentlicher Bestandteil zur Entwicklung von Kolonnenpackungen, und andererseits für eine präzise Simulation und Auslegung von Packungskolonnen essentiell. An der Montanuniversität Leoben sind beispielsweise in den Arbeiten von Pesendorfer (2018) [14] und Haushofer (2020) [15] bereits erfolgreich Untersuchungen des Druckverlustes und Flüssigkeitsinhaltes trennwirksamer Einbauten wie geordneter Packungen an zwei Versuchseinrichtungen mit Kolonnen-Innendurchmessern von 422 beziehungsweise 150 mm durchgeführt worden. Um zusätzlich die Untersuchung von Stofftransportparametern trennwirksamer Einbauten an diesen Anlagen zu ermöglichen, müssen zuerst hierfür geeignete Messverfahren implementiert werden.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll an zwei am Lehrstuhl befindlichen Ab-/Desorptionskolonnen unterschiedlicher Größe erstmalig die Bestimmung von Stofftransportparametern für eine umfassende Packungscharakterisierung umgesetzt werden.

Im Detail sollen Verfahren zur Bestimmung der effektiven Phasengrenzflächen (a_e), sowie der flüssigkeitsseitigen und gaseitigen volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten (k_{La_e} und k_{Ga_e}) implementiert und ausgeführt werden. Hierzu sind nach einer Literaturrecherche bezüglich geeigneter Bestimmungsmethoden und entsprechender Vorbereitung beider Versuchsanlagen, diese Stofftransportparameter von kommerziell erhältlichen Packungsgeometrien zu bestimmen. Die zu diesem Zweck verwendeten Messverfahren sollen dokumentiert werden.

Um die Plausibilität der in dieser Arbeit ermittelten Stofftransportparameter zu überprüfen, sollen diese, falls verfügbar, mit Ergebnissen anderer Forschungsgruppen verglichen werden. Neben Versuchsergebnissen anderer Autoren können hierfür auch empirische Modelle der Fachliteratur herangezogen werden. Außerdem sollen untersuchte Packungsgeometrien auf Basis ermittelter Stofftransportparameter miteinander verglichen werden.

Ergebnisse zu Stofftransportparametern gleicher Packungsgeometrien verschiedenen Durchmessers sollen gegenübergestellt und diskutiert werden. Abweichende Rahmenbedingungen der Versuche an den beiden Anlagen sind dabei zu dokumentieren.

Eine Implementierung der Bestimmungsverfahren von Stofftransportparametern an den Versuchsständen des Lehrstuhls stellt die Grundlage für weiterführende Untersuchungen dar. Erkenntnisse aus dieser Arbeit zum Einfluss des Kolonnendurchmessers auf Stofftransportparameter können als Ausgangspunkt für die Entwicklung von kostensparenden Bestimmungsmethoden dienen, welche eine Übertragbarkeit von Packungscharakteristika auf Apparate abweichender Dimensionierung erlauben.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden im Rahmen dieser Arbeit relevante Grundlagen und verwendete Fachbegriffe erläutert. Abschnitt 2.2 behandelt die Stofftransportvorgänge Ab- und Desorption. Empirische Formeln zur Überprüfung in dieser Arbeit ermittelter Stofftransportparameter sind im Abschnitt 2.3 dieses Kapitels vorgestellt.

2.1 Grundlagen zu Packungskolonnen

Unter Absorption wird die Aufnahme und Lösung eines oder mehrerer gasförmiger Stoffe (Absorptive) in einer Flüssigkeit verstanden [1]. Die verwendete (Wasch-)Flüssigkeit wird auch als Absorbens oder Wasch-, Lösungs- beziehungsweise Absorptionsmittel bezeichnet [3]. Im beladenen Zustand wird diese Flüssigkeit als Absorbat bezeichnet [3].

Absorptionsprozesse sind grundsätzlich exotherm [8]. Prinzipiell ist Absorption bei hohen Drücken und tiefen Temperaturen begünstigt [3, 16]. Da mit einer Temperaturerhöhung ein vermindertes Absorptionsvermögen einhergeht, strebt man in praktischen Anwendungen eine isotherme Betriebsweise an [2].

Treten in der Waschflüssigkeit weder eine chemische Umsetzung oder Dissoziation des Absorptivs auf, spricht man von Physisorption. Andernfalls liegt Chemisorption vor [13]. Unter Desorption (auch Strippen) versteht man den umgekehrten Vorgang der Absorption, wobei gelöste Stoffe in ein Trägergas übergehen [1].

Wie in Abbildung 1 veranschaulicht, kann Waschflüssigkeit kontinuierlich regeneriert werden. Je nach Anwendung kann dies mithilfe von Regeneratoren durch mehrstufige Entspannung, Temperaturerhöhung (e.g. Rektifikation), Dampf- beziehungsweise Inertgasstrippen oder chemische Fällung erfolgen [3].

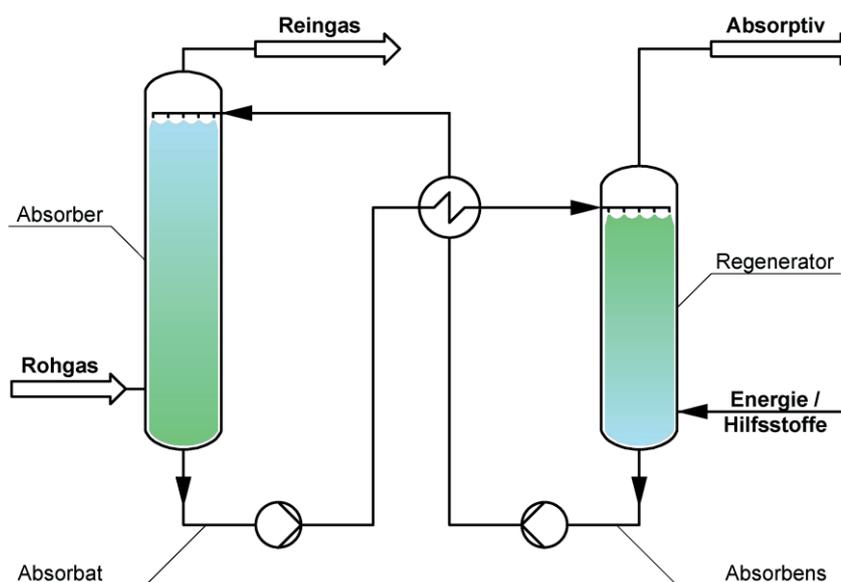


Abbildung 1: Trennprinzip der Absorption mit Regeneration des Absorbens nach Sattler [2].

Im Hinblick auf Kriterien wie der Löslichkeit oder dem vorhandenen Gasvolumenstrom sind unterschiedliche Apparateausführungen zweckmäßig. Blasensäulen eignen sich beispielsweise bei hohem Stofftransportwiderstand in der flüssigen Phase. Sprühwäscher sind dagegen bei hohem Gasdurchsatz und gasseitig dominierendem Stofftransportwiderstand geeignet [17]. Packungskolonnen zeichnen sich insbesondere durch einen geringen Druckverlust bei gleichzeitig hoher Trennleistung aus [18].

Wie einleitend beschrieben, sind Packungskolonnen übliche Trennapparate für Absorptionsprozesse. Im Wesentlichen sind Packungskolonnen zylindrische Apparate, deren Inneres zur Erhöhung der Kontaktfläche zwischen den Phasen mit Strukturen (trennwirksame Einbauten) ausgefüllt ist. Diese werden im Gegenstrom betrieben, wobei die flüssige Phase von oben durch die Kolonne fließt, während die Gasphase nach oben geleitet wird.

Die geometrische Gestaltung von trennwirksamen Einbauten wie geordneter Packungen wirkt sich einerseits auf deren hydraulische Eigenschaften wie den zu überwindenden Druckverlust und andererseits über die Beeinflussung von Stofftransportparametern auf die Trennleistung aus.

Im Unterschied zu strukturiert beziehungsweise geordnet bezeichneten Packungen gibt es Füllkörperschüttungen (ungeordnete Packungen). Diese bestehen aus Schüttungen einzelner, beispielsweise ring- oder sattelförmiger Elemente mit einem relativ zum Kolonnendurchmesser geringen Nenndurchmesser. In Packungs- und Füllkörperkolonnen liegen sowohl die flüssige Phase als auch die Gasphase kontinuierlich vor [2].

Ein möglicher innerer Aufbau einer Packungskolonne ist in Abbildung 2 gezeigt [8]. Darin sind auch übliche nicht trennwirksame Einbauten wie ein Gaseinleitrohr, Flüssigkeitsverteiler und Tropfenabscheider dargestellt.

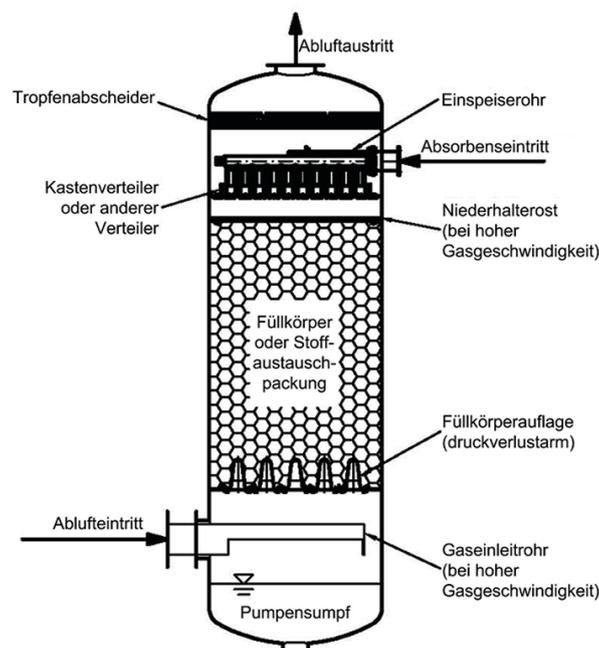


Abbildung 2: Aufbau einer Packungs- bzw. Füllkörperkolonne [8].

Geordnete Packungen (in Abbildung 2 als Wabenmuster dargestellt) bestehen meist aus einzelnen übereinandergeschichteten Elementen. Bei großen Kolonnendurchmessern (bis zu 15 m) können auch einzelne Schichten aus mehreren Elementen zusammengesetzt sein [19].

Angelehnt an die VDI-Richtlinie 2761 [13] werden in dieser Arbeit in Kolonnen ein- und austretende Fluidvolumenströme durch auf den Kolonnenquerschnitt bezogene Größen ausgedrückt. Zur Beschreibung des Gasvolumenstroms dient der sogenannte F-Faktor (Gasbelastungsfaktor, F) mit der Einheit $\text{Pa}^{1/2}$. In dieser Größe ist auch die Gasdichte ρ_G berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt gemäß Gleichung 2-1. Der Quotient aus Gasvolumenstrom \dot{V}_G und Kolonnenquerschnitt A_K entspricht dabei der Gasleerrohrgeschwindigkeit u_G .

$$F = \frac{\dot{V}_G}{A_K} \cdot \sqrt{\rho_G} \quad (2-1)$$

Übliche F-Faktoren liegen zwischen 0,1 und 4 $\text{Pa}^{1/2}$ [13]. Die Berieselungsdichte u_L ist durch das Verhältnis des Flüssigkeitsvolumenstroms zum Kolonnenquerschnitt gemäß Gleichung 2-2 definiert. Für die so ausgedrückte Flüssigkeitsbelastung wird die Einheit $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ oder m h^{-1} verwendet.

$$u_L = \frac{\dot{V}_L}{A_K} \quad (2-2)$$

In der Praxis liegen gängige Berieselungsdichten zwischen 1 und 120 m h^{-1} [13].

Der spezifische Druckverlust $\Delta p/Z$ (Z steht für die Packungshöhe) und der relative Flüssigkeitsinhalt h_L (auch als Hold-up bezeichnet) sind wesentliche fluiddynamische Parameter. Der Druckabfall Δp der Gasströmung resultiert dabei aus Reibungsverlusten. Der relative Flüssigkeitsinhalt h_L ist das Verhältnis aus dem Flüssigkeitsvolumen in der Packung V_L und dem durch die Packung eingenommenen Zylindervolumen V_P (cf. Gleichung 2-3).

$$h_L = \frac{V_L}{A_K \cdot Z} = \frac{V_L}{V_P} \quad (2-3)$$

Der relative Flüssigkeitsinhalt ist eine Funktion der Berieselungsdichte. Bei erhöhter Gasbelastungen ist h_L auch vom F-Faktor abhängig [1]. Der Hold-up kann auch als Maß für die Flüssigkeitsverweilzeit in der Packungskolonie aufgefasst werden.

Der Arbeitsbereich von Packungskolonnen ist durch zwei Betriebsgrenzen eingeschränkt (Entnetzungs- und Flutgrenze) [18].

Zum einen gibt es die Entnetzungsgrenze. Dabei handelt es sich um eine minimale Flüssigkeitsbelastung, welche bei Unterschreitung eine deutliche Reduzierung der Flüssigkeitsfilmoberfläche für den Stofftransport zur Folge hat.

Bei ansteigender Gas- und / oder Flüssigkeitsbelastung der Kolonne kommt es ab einem sogenannten Staupunkt zu einer Zunahme des Hold-ups und einer verstärkten gegenseitigen Wechselwirkung der

Fluidströme. Aufgrund von Turbulenzen an umströmten Flüssigkeitsfilmen ist der Stofftransport ab diesem Punkt intensiviert [18].

Bei weiterer Erhöhung der Belastung wird in Packungskolonnen die Flutgrenze erreicht. In diesem Bereich kommt es zu einer erheblichen Erhöhung des Druckverlustes und des Flüssigkeitsinhalts, bis schließlich das Gegenstromprinzip zu Erliegen kommt [13].

Die Phasengrenzfläche A zwischen Flüssigkeitsfilm und Gasstrom, bezogen auf das durch die Packung eingenommene Volumen V_P wird volumenbezogene Phasengrenzfläche oder auch spezifische effektive Phasengrenzfläche a_e genannt (cf. Gleichung 2-4). In dieser Arbeit wird a_e als effektive Phasengrenzfläche bezeichnet.

$$a_e = \frac{A}{A_K \cdot Z} = \frac{A}{V_P} \quad (2-4)$$

Über diese effektiven Phasengrenzflächen findet der Stofftransport von Ab- und Desorptionsprozessen statt. Die effektive Phasengrenzfläche a_e wird in dieser Arbeit auch bezogen auf die spezifische geometrische Packungsoberfläche a_p als Verhältnis laut Gleichung 2-5 angegeben. A_p steht darin für die geometrische Packungsoberfläche.

$$a_e/a_p = \frac{(A/V_P)}{(A_p/V_P)} \quad (2-5)$$

2.2 Beschreibung von Ab-/Desorptionsvorgängen

Zur Beschreibung von Ab- und Desorptionsvorgängen kommt in dieser Arbeit vorrangig die Zweifilmtheorie nach Lewis und Whitman (1924) [20] zum Einsatz. Diese Modellvorstellung geht von einer Grenzfläche zwischen Gas- und Flüssigkeitsphase aus, an welcher beidseitig stationäre Grenzschichten (Filme) angelagert sind [20]. Gemäß der Zweifilmtheorie ist der Stofftransport durch Diffusion innerhalb dieser Schichten bestimmt [3, 20]. Außerhalb der Grenzschichten, in den Kernzonen der jeweiligen Phasen, werden konstante Konzentrationen der Übergangskomponente aufgrund idealer Durchmischung angenommen [3, 20]. Weiters gilt die Voraussetzung, dass an der Phasengrenzfläche Gas- und Flüssigkeitskonzentration im Gleichgewicht sind [20]. Gas- und flüssigkeitsseitige Konzentrationen einer übergehenden Komponente sind somit an der Grenzfläche über einen Gleichgewichtskoeffizienten miteinander verknüpft [3].

Die eindimensionale Diffusion einer Komponente i durch eine Grenzschicht ist mit dem 1. Fickschen Gesetz [21] gemäß Gleichung 2-6 beschreibbar. Der Stoffmengenstrom \dot{n}_i ist demzufolge proportional dem Produkt aus Diffusionskoeffizient $D_{i,j}$, Phasengrenzfläche A und Konzentrationsgefälle Δc_i über die Grenzschichtdicke δ .

$$\dot{n}_i = D_{i,j} \cdot A \cdot \frac{\Delta c_i}{\delta} \quad (2-6)$$

Aus obiger Gleichung ist die Analogie zum Fourierschen Gesetz der Wärmeleitung ersichtlich [22]. Der Quotient aus Diffusionskoeffizient und Grenzschichtdicke in Gleichung 2-7 kann bei Anwendung der Zweifilmtheorie als Stoffübergangskoeffizient k_i mit der Einheit einer Geschwindigkeit aufgefasst werden [3]:

$$k_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{D_{i,j}}{\delta} \quad (2-7)$$

Für Absorptionsprozesse mit geringen Gaskonzentrationen kann die Konzentrationsabhängigkeit von Stoffübergangskoeffizienten k_i vernachlässigt werden. Damit können sie als Funktionen der Gas- und Flüssigkeitsphasengeschwindigkeit, dem Diffusionskoeffizienten und der geometrischen Gegebenheiten aufgefasst werden [8]. Der Kehrwert von k_i kann als Stoffübergangswiderstand angesehen werden. Der übergehende Stoffmengenstrom einer Übergangskomponente i aus der Gasphase ist gemäß Gleichung 2-8 gleich jenem in die flüssige Phase [20].

$$\dot{n}_i = \dot{n}_{i,G} = \dot{n}_{i,L} \quad (2-8)$$

Nun können die Stoffübergänge in den Phasen durch Einsetzen in Gleichung 36 beschrieben werden. In dieser Arbeit wird die Schreibweise mit Stoffmengenanteilen anstatt Konzentrationen bevorzugt. Die in Gleichung 2-9a und 2-9b definierten molaren Dichten stellen hierfür die Umrechnungsfaktoren dar.

$$a) \frac{\rho_G}{M_G} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{\rho}_G; \quad b) \frac{\rho_L}{M_L} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{\rho}_L \quad (2-9)$$

Der Stoffübergang einer Komponente aus der Gas-Kernzone durch die gasseitige Grenzschicht an die Phasengrenzfläche ergibt sich damit zu Gleichung 2-10 [20].

$$\dot{n}_i = k_{i,G} \cdot \tilde{\rho}_G \cdot A \cdot (y_i - y_{i,\text{ph}}) \quad (2-10)$$

Bezogen auf die Flüssigkeitsphase lässt sich der Stoffübergang in analoger Weise nach Gleichung 2-11 beschreiben [20].

$$\dot{n}_i = k_{i,L} \cdot \tilde{\rho}_L \cdot A \cdot (x_{i,\text{ph}} - x_i) \quad (2-11)$$

Die in den obigen Gleichungen vorkommenden Konzentrationen an der Phasengrenze $y_{i,\text{ph}}$ und $x_{i,\text{ph}}$ sind unbekannt [16]. Mithilfe von Gleichgewichtsbedingungen ist es möglich diese unbekannt Konzentrationen zu eliminieren [3]. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist das chemische Potential in der flüssigen und gasförmigen Phase gleich (cf. Gleichung 2-12a) [8]. Nach Umformen von Gleichung 2-12a zu Gleichung 2-12b folgt unter Annahme konstanter Temperatur ein gleichbleibendes Verhältnis der Aktivitäten a .

$$a) \mu_{i,G}^0 + R \cdot T \cdot \ln a_{i,G} = \mu_{i,L}^0 + R \cdot T \cdot \ln a_{i,L}; \quad b) \frac{a_{i,G}}{a_{i,L}} = \exp\left(\frac{\mu_{i,L}^0 - \mu_{i,G}^0}{R \cdot T}\right) \quad (2-12)$$

Unter Annahme idealen Verhaltens kann dieses Verhältnis durch einen Gleichgewichtskoeffizienten K_i wie beispielsweise einer Henry-Konstanten ausgedrückt werden [8]. An der Phasengrenzfläche gilt somit der Zusammenhang nach Gleichung 2-13 [3, 23, 8].

$$y_{i,\text{ph}} = K_i \cdot x_{i,\text{ph}} \quad (2-13)$$

Kernphasenkonzentrationen übergewandter Komponenten können als Gleichgewichtskonzentration in der jeweils anderen Phase ausgedrückt werden (cf. Gleichung 2-14a und 2-14b) [3, 8].

$$a) y_i = K_i \cdot x_i^*; \quad b) x_i = \frac{1}{K_i} \cdot y_i^* \quad (2-14)$$

Anschließend können beispielsweise die flüssigkeitsseitigen Konzentrationen in Gleichung 2-11 mithilfe der Gleichungen 2-13 und 2-14b ersetzt werden. Die gasseitige Konzentration an der Phasengrenze $y_{i,\text{ph}}$ kann dabei über die Gleichung 2-10 ausgedrückt werden. Nach weiteren Umformungsschritten kann schließlich der auf die Gasphase bezogene Stoffdurchgang mit Gleichung 2-15 beschrieben werden:

$$\dot{n}_i = \left(\frac{1}{k_{i,G}} + \frac{K_i \cdot \tilde{\rho}_G}{k_{i,L} \cdot \tilde{\rho}_L} \right)^{-1} \cdot \tilde{\rho}_G \cdot A \cdot (y_i - y_i^*) = k_{i,OG} \cdot \tilde{\rho}_G \cdot A \cdot (y_i - y_i^*) \quad (2-15)$$

Der Klammerausdruck in Gleichung 2-15 wird als auf die Gasphase bezogene Stoffdurchgangskoeffizient $k_{i,OG}$ bezeichnet.

In analoger Weise ist auch der auf Flüssigkeitskonzentrationen bezogene Stoffdurchgangskoeffizient $k_{i,OL}$ herleitbar, welcher die Form in Gleichung 2-16 annimmt.

$$\dot{n}_i = \left(\frac{1}{k_{i,L}} + \frac{\tilde{\rho}_L}{K_i \cdot k_{i,G} \cdot \tilde{\rho}_G} \right)^{-1} \cdot \tilde{\rho}_L \cdot A \cdot (x_i^* - x_i) = k_{i,OL} \cdot \tilde{\rho}_L \cdot A \cdot (x_i^* - x_i) \quad (2-16)$$

Der Gleichgewichtskoeffizient K_i in den obigen Gleichungen entspricht unter Verwendung von Stoffmengenanteilen dem Steigungsmaß m gerader Gleichgewichtskurven [23]. Für Berechnungen ist diese Definition auch für geringfügig gekrümmte Gleichgewichtskurven verwendbar [23]. Dieses Steigungsmaß m wird für Absorptionsgleichgewichte bevorzugt durch das Henry-Gesetz beschrieben [1]. Damit getroffene Annahmen idealen Verhaltens sind für Absorptionsvorgänge in Anwendungen zur Abgasreinigung bei atmosphärischen Bedingungen und verdünnten Waschlösungen rechtfertigbar [8]. Henry-Konstanten (auch Henry-Koeffizienten genannt) sind für viele Stoffe und Medien experimentell bestimmt und in Werken wie von Sander (2015) [24] veröffentlicht.

In speziellen Fällen können die hergeleiteten Ausdrücke der Stoffdurchgangskoeffizienten vereinfacht werden. Wenn beispielsweise der Stofftransportwiderstand der Gasphase dominiert, kann der gaseitige Stoffübergangskoeffizient $k_{i,G}$ mit dem Stoffdurchgangskoeffizienten $k_{i,OG}$ gleichgesetzt werden (cf. Gleichung 2-17).

$$\frac{k_{i,L}}{m} \gg k_{i,G} \rightarrow k_{i,OG} \approx k_{i,G} \quad (2-17)$$

In der umgekehrten Situation, wenn der Widerstand hauptsächlich in der flüssigen Phase vorliegt vereinfacht sich im Grenzfall der Ausdruck für den auf die flüssige Phase bezogenen Stoffdurchgangskoeffizient $k_{i,OL}$ gemäß Gleichung 2-18 [3].

$$k_{i,G} \cdot m \gg k_{i,L} \rightarrow k_{i,OL} \approx k_{i,L} \quad (2-18)$$

Findet in der Flüssigphase eine chemische Reaktion der übergehenden Komponente statt, kann dies im Ausdruck der Stoffdurchgangskoeffizienten durch einen sogenannten „Enhancement-Faktor“ E berücksichtigt werden (cf. Gleichung 2-19). Dieser Faktor ist über das Verhältnis zwischen flüssigkeitsseitigen Stoffübergangskoeffizienten mit und ohne chemischer Reaktion definiert [8, 23].

$$\frac{1}{k_{i,OG}} = \frac{1}{k_{i,G}} + \frac{m \cdot \tilde{\rho}_G}{E \cdot k_{i,L} \cdot \tilde{\rho}_L} \quad (2-19)$$

Ist das Steigungsmaß m klein (gute Löslichkeit) und zusätzlich der Enhancement-Faktor E groß, dominiert der gaseitige Widerstand $k_{i,G}^{-1}$ und obiger Zusammenhang kann zu Gleichung 2-20a vereinfacht werden [8]. Im umgekehrten Fall kann $k_{i,OG}$ durch Gleichung 2-20b angenähert werden [8].

$$a) k_{i,OG} \approx k_{i,G} \quad b) k_{i,OG} \approx \frac{E \cdot k_{i,L} \cdot \tilde{\rho}_L}{m \cdot \tilde{\rho}_G} \quad (2-20)$$

Um aus Versuchsdaten volumetrische Stoffdurchgangskoeffizienten ermitteln zu können, wird in dieser Arbeit das HTU-NTU-Konzept angewandt. Zur Herleitung geht man von einem differentiellen Volumenelement im Querschnitt einer im stationären Gegenstrom betriebenen Absorptionskolonne aus [3, 22]. Für das Bilanzgebiet der Gasphase ergeben sich die ein- und austretenden Gasströme nach Gleichung 2-21. Diese Bilanz wird mit Trägergasströmen \dot{G} und Molbeladungen Y ausgedrückt.

$$\dot{G}(Y + dY) = \dot{G} \cdot Y + d\dot{n} \quad (2-21)$$

In dieser Arbeit werden hier Beladungen mit Stoffmengenanteilen ersetzt. Ein daraus resultierender Fehler ist für niedrige Konzentrationen übergehender Komponenten ($< 1\%$) vernachlässigbar.

Der differentielle Stoffmengenstrom $d\dot{n}_i$ kann über Gleichung 2-21 und mithilfe der Gleichung 2-15 ausgedrückt werden [3, 22]. Nach Gleichsetzen ergibt sich daraus Gleichung 2-22.

$$d\dot{n}_i = \dot{G} \cdot dy = k_{i,OG} \cdot \tilde{\rho}_G \cdot (y_i - y_i^*) \cdot dA \quad (2-22)$$

Das differenzielle Flächenelement dA in Gleichung 2-22 betrifft die für den Stofftransport wirksame Phasengrenzfläche. Da der Kolonnenquerschnitt A_K konstant ist, kann dA mit einer mittleren effektiven Phasengrenzfläche a_e über die differentielle Packungshöhe dZ entsprechend Gleichung 2-23 ausgedrückt werden [22].

$$dA = a_e \cdot A_K \cdot dZ \quad (2-23)$$

Eingesetzt in Gleichung 2-22 folgt daraus nach Trennung der Variablen und Integration die Gleichung 2-24. Dabei werden $k_{i,OG}$ und a_e als konstant angenommen. Die Indices „u“ und „o“ bezeichnen in nachstehender Gleichung die Messstellen unter- beziehungsweise oberhalb der Packung.

$$\int_0^Z dZ = \frac{\dot{G}}{k_{i,OG} \cdot \tilde{\rho}_G \cdot a_e \cdot A_K} \cdot \int_{y_{i,o}}^{y_{i,u}} \frac{dy}{(y_i - y_i^*)} \quad (2-24)$$

Dieser Zusammenhang kann auch in Form der Gleichung 2-25 geschrieben werden [3, 22].

$$Z = HTU_{OG} \cdot NTU_{OG} \quad (2-25)$$

Darin entspricht HTU_{OG} der Höhe einer Übertragungseinheit, welche über Gleichung 2-26 definiert ist (HTU: Height of Transfer Units) [3, 22].

$$HTU_{OG} = \frac{\dot{G}}{k_{i,OG} \cdot \tilde{\rho}_G \cdot a_e \cdot A_K} \quad (2-26)$$

Der Ausdruck NTU_{OG} gibt die Anzahl an Übertragungseinheiten gemäß Gleichung 2-27 wieder (NTU: Number of Transfer Units) [3, 22].

$$NTU_{OG} = \int_{y_{i,o}}^{y_{i,u}} \frac{dy}{(y_i - y_i^*)} \quad (2-27)$$

Im Fall der Chemisorption verschwindet das Absorptiv bei ausreichender Aufnahmefähigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit in der flüssigen Kernphase durch Reaktion (chemische Umsetzung oder Dissoziation) vollständig [8]. Da somit keine Gleichgewichtskonzentration y_i^* vorliegt, ist eine vereinfachte Lösung von NTU_{OG} entsprechend Gleichung 2-28 möglich [8].

$$NTU_{OG} = \ln\left(\frac{y_{i,u}}{y_{i,o}}\right) \quad (2-28)$$

Die Berechnung auf die Gasphase bezogener volumetrischer Stoffdurchgangskoeffizienten $k_{OG}a_e$ ist in diesem Fall unter Verwendung obiger Zusammenhänge über Gleichung 2-29 möglich.

$$k_{OG} \cdot a_e = \frac{\dot{G}}{\tilde{\rho}_G \cdot A_K \cdot Z} \cdot \ln\left(\frac{y_{i,u}}{y_{i,o}}\right) = \frac{u_G}{Z} \cdot \ln\left(\frac{y_{i,u}}{y_{i,o}}\right) \quad (2-29)$$

Ausgehend vom Bilanzraum der flüssigen Phase kann über die Herleitung des HTU-NTU-Konzepts in analoger Weise ein Ausdruck für den volumetrischen Stoffdurchgangskoeffizienten $k_{OL}a_e$ (auf die flüssige Phase bezogen) gemäß Gleichung 2-30 angeschrieben werden.

$$k_{OL} \cdot a_e = \frac{\dot{L}}{\bar{\rho}_L \cdot A_K \cdot Z} \cdot \ln \left(\frac{x_{i,o}}{x_{i,u}} \right) = \frac{u_L}{Z} \cdot \ln \left(\frac{x_{i,o}}{x_{i,u}} \right) \quad (2-30)$$

Zur Beschreibung des Stofftransports bei Absorptionsprozessen gibt es neben der Zweifilmtheorie auch beispielsweise die Penetrationstheorie oder die Oberflächenerneuerungstheorie [3]. Die Penetrationstheorie (Higbie, 1935) berücksichtigt durch die Einführung einer Phasen-Kontaktzeit instationären Stofftransport [3]. Darauf aufbauend führt die Oberflächenerneuerungstheorie (Danckwerts, 1951) zusätzlich eine Kontaktverweilzeitverteilung von Fluidelementen ein [3]. Weil Faktoren wie Kontaktzeiten und deren Verteilung meist nicht bekannt sind, dienen diese Theorien oft lediglich als Modellvorstellungen [23].

2.3 Empirische Berechnungsformeln für Stofftransportparameter

Zur Vorhersage von Stofftransportparametern existieren für trennwirksame Einbauten in der Fachliteratur empirische Formeln.

Von Schlager et al (2022) [25] sind beispielsweise Korrelationen basierend auf Versuchsergebnissen zu $k_L a_e$ und $k_G a_e$ geordneter Metallpackungen verschiedener Autoren zusammengefasst worden. Neben Modellen für diese Parameter gibt es auch einige Modelle zur Abschätzung effektiver Phasengrenzflächen a_e .

Nachfolgend sind jene a_e -Modelle vorgestellt, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit für Vergleiche mit eigenen Ergebnissen genutzt werden.

Diese Modelle nutzen die in Gleichung 2-31, 2-32 und 2-33 angeführten dimensionslosen Kennzahlen Reynolds- (Re_L), Weber- (We_L) und Froude-Zahl (Fr'_L).

$$Re_L = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}} = \frac{\rho_L \cdot u_L \cdot L}{\mu_L} \quad (2-31)$$

$$We_L = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Oberflächenkraft}} = \frac{\rho_L \cdot u_L^2 \cdot L}{\sigma} \quad (2-32)$$

$$Fr'_L = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}} = \frac{u_L^2}{g \cdot L} \quad (2-33)$$

Die im Folgenden erwähnten Modelle von Tsai (2010), Wang (2015), und Song (2017) basieren auf Versuchsergebnissen der Absorption atmosphärischen Kohlenstoffdioxids in 0,1 molarer Natronlauge [26, 27, 28]. Diesbezügliche Versuche erfolgten an derselben Versuchseinrichtung mit einem Kolonneninnendurchmesser von 0,43 m [26, 27, 28]. Das am Ende dieses Abschnitts vorgestellte Modell von Onda et al (1968) ist allgemein anerkannt [28]. Es wird beispielsweise von Tsai (2010) [26] für Vergleiche experimentell ermittelter a_e geordneter Packungen verwendet. Zum Teil tritt dabei eine

bessere Übereinstimmung als zu anderen Literaturmodellen auf. Als charakteristische Länge L der genannten dimensionslosen Kennzahlen wird in den Modellen von Wang (2010), Song (2017) und Onda et al (1968) der Kehrwert der spezifischen Packungsfläche a_p verwendet [27, 28, 29]. Diese charakteristische Länge ist auch eine gute Näherung für das Modell von Tsai (2010) [27].

Das von Tsai (2010) entwickelte Modell zur Vorhersage von a_e gemäß Gleichung 2-34 basiert auf Untersuchungen 9 geordneter Metallpackungen [26]. Die zur Modellentwicklung verwendeten Versuchsergebnisse werden dadurch innerhalb einer Abweichung von $\pm 13\%$ wiedergegeben [26].

$$\frac{a_e}{a_p} = 1,34 \cdot \left(We_L \cdot Fr_L'^{(-1/3)} \right)^{0,116} \quad (2-34)$$

In dem von Wang (2010) [27, 30] zu a_e veröffentlichten Modell nach Gleichung 2-35 werden 11 geordnete Metallpackungen und drei Füllkörperschüttungen berücksichtigt. Das Modell beschreibt dessen Datengrundlage mit einer mittleren Abweichung von $10,5\%$ [27].

$$\frac{a_e}{a_p} = 1,41 \cdot \left(We_L \cdot Fr_L'^{(-1/3)} \right)^{0,116} \quad (2-35)$$

Von Song (2017) [28, 31] wurde auf Basis von Versuchsdaten zu insgesamt 39 Packungen, einschließlich 21 geordneter Packungen ein Modell für a_e entwickelt, welches eine mittlere absolute Abweichung von $8,9\%$ aufweist [28]. In diesem Modell gemäß Gleichung 2-36 sind sekundäre Phasengrenzflächen, wie zum Beispiel an der Kolonneninnenwand oder Flächen über und unterhalb eingebauter Packungen, exkludiert. Dazu wurde beispielsweise von einer vollständig benetzten Innenwandfläche der Kolonne ausgegangen und diese als sekundäre Phasengrenzfläche vor Erstellung des Modells von Versuchsergebnissen abgezogen. Der im Modell enthaltene Faktor η_{Song} ist eine Funktion von Packungsart und -Material sowie des Arbeitsbereichs.

$$\frac{a_e}{a_p} = 1,16 \cdot \eta_{\text{Song}} \cdot \left(We_L \cdot Fr_L'^{(-1/2)} \right)^{0,138} \quad (2-36)$$

Ein von Onda et al (1968) [29] entwickeltes Modell ist in Gleichung 2-37 angegeben. Es dient zur Vorhersage benetzter Oberflächen a_w von Füllkörperschüttungen. Von den Autoren wird angenommen, dass a_w der Phasengrenzfläche a_e entspricht, indem das Modell auch für die Auswertung von Stoffübergangskoeffizienten angewandt wird. Für das Modell wurde eine Anwendbarkeit innerhalb Fehlergrenzen von $\pm 20\%$ gezeigt [29].

$$\frac{a_w}{a_p} \cong \frac{a_e}{a_p} = 1 - \exp \left[-1,45 \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right)^{0,75} \cdot Re_L^{0,1} \cdot Fr_L'^{-0,05} \cdot We_L^{0,2} \right] \quad (2-37)$$

3 Material und Methoden

Dieses Kapitel beschreibt in den nachfolgenden Abschnitten die verwendeten Versuchsstände, untersuchte Packungsgeometrien, angewandte Messverfahren sowie die Durchführung der Versuche und deren Auswertung.

3.1 Versuchsstände

Für Versuche dieser Arbeit werden zur Bestimmung von Stofftransportparametern zwei Versuchsstände mit Ab-/Desorptionskolonnen unterschiedlicher Größe verwendet. Diese befinden sich in Versuchshallen der Montanuniversität Leoben und sind im Wesentlichen gleich aufgebaut. Entsprechend deren innerem Messkolonnendurchmesser von 422 mm beziehungsweise 150 mm tragen sie in dieser Arbeit die Bezeichnung Versuchsstand-422 (kurz V-422) beziehungsweise Versuchsstand-150 (kurz V-150). Messkolonnen sind diejenigen Teile der Versuchseinrichtungen, in welchen der zu untersuchende Stofftransport über Phasengrenzflächen an trennwirksamen Einbauten (Packungen) stattfindet. Der Aufbau der Versuchsstände ist im Abschnitt 3.1.1 näher beschrieben.

Nachstehend sind die prinzipiellen Messvorgänge in den Messkolonnen der Versuchsstände zur Bestimmung der Stofftransportparameter a_e , $k_L a_e$ und $k_G a_e$ angeführt. In Abschnitt 3.3 wird genauer auf die angewandten Messverfahren zur Bestimmung dieser Stofftransportparameter eingegangen. Im Prinzip werden bei diesen Messverfahren an einer Packung jeweils Ein- und Austrittskonzentration einer bei Ab-/Desorptionsprozessen übergehenden Komponente bestimmt.

Zur Bestimmung von effektiven Phasengrenzflächen a_e wird in der Gasphase die CO_2 -Konzentration gemessen. Um flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ zu bestimmen, wird der Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Flüssigkeit über Analyse von Flüssigkeitsproben bestimmt. Die Bestimmung von gasseitigen volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$ erfolgt über die Messung der SO_2 -Konzentrationen in der Gasphase.

Die Einrichtungen der Versuchsstände zur Messgas- beziehungsweise Flüssigkeitsprobenentnahme sind in Abschnitt 3.1.2 beschrieben.

Im Abschnitt 3.1.3 dieses Kapitels ist die an den Versuchsständen eingesetzte Messtechnik angeführt.

Für Versuche zur Bestimmung der genannten Stofftransportparameter (a_e , $k_L a_e$, $k_G a_e$) werden jeweils etwas unterschiedliche Anlagenkonfigurationen verwendet. Diesbezügliche Schemata sind im Kapitel 3.4 zur Versuchsdurchführung angeführt.

3.1.1 Aufbau

Im Folgenden ist der Aufbau der Versuchsstände erläutert. Hierzu ist in Abbildung 3 ein Verfahrensfließschema dargestellt, welches beide Versuchsstände beschreibt.

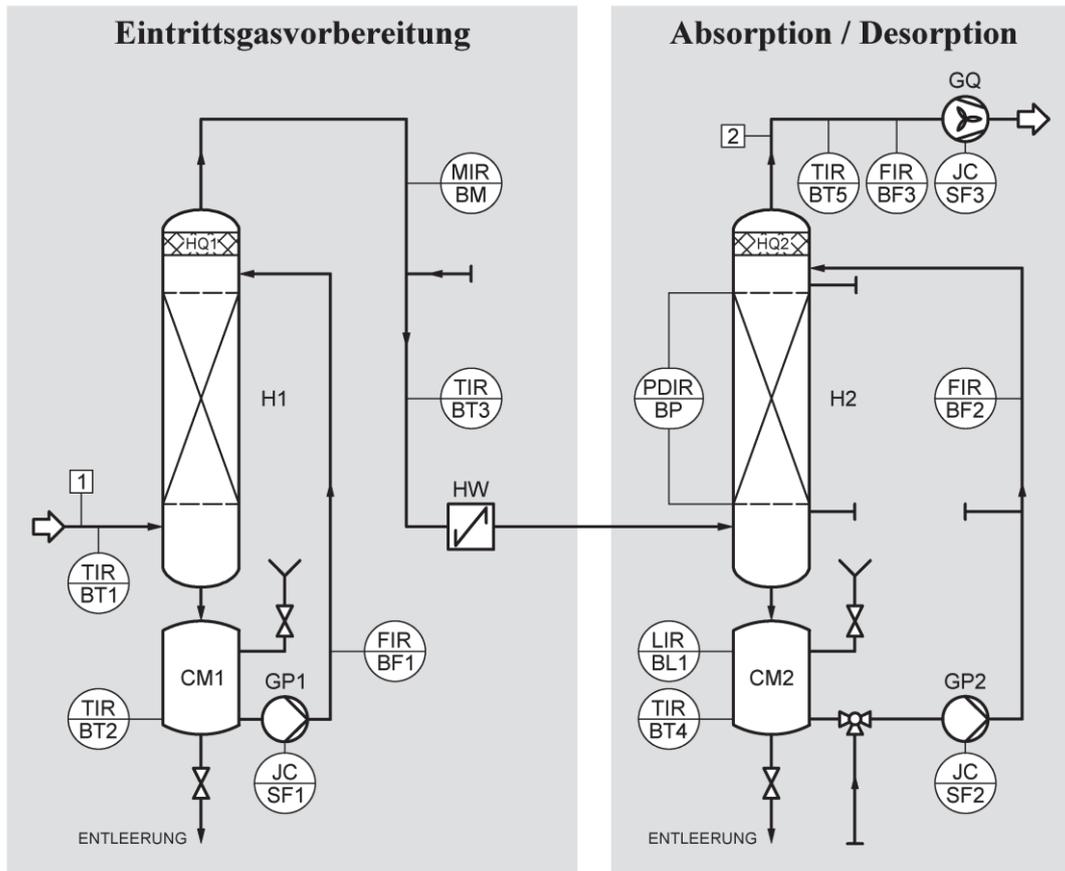


Abbildung 3: Verfahrensfließschema der Versuchsstände V-422 und V-150.

Im Verfahrensfließschema (Abbildung 3) verwendete Bezeichnungen von Geräten und Instrumenten sind in Tabelle 1 erläutert.

Tabelle 1: Legende zum Verfahrensfließschema in Abbildung 3.

| Bezeichnung | Art | Beschreibung |
|-------------|--------------------|--|
| 1 | Strom | Umgebungsluft |
| 2 | Strom | Abluft |
| BF1 | Sensor | Durchflussmessung Flüssigkeit Luftbefeuchter |
| BF2 | Sensor | Durchflussmessung Flüssigkeit Messkolonne |
| BF3 | Sensor | Durchflussmessung Gas |
| BL1 | Sensor | Füllstandmessung Messkolonnensumpf |
| BM | Sensor | Feuchtemessung Gas |
| BP | Sensor | Druckverlustmessung Messkolonne |
| BT1 | Sensor | Temperaturmessung Umgebungsluft |
| BT2 | Sensor | Temperaturmessung Sumpf Luftbefeuchter |
| BT3 | Sensor | Temperaturmessung Gasaustritt Luftbefeuchter |
| BT4 | Sensor | Temperaturmessung Sumpf Messkolonne |
| BT5 | Sensor | Temperatur Gasaustritt Messkolonne |
| CM1 | Behälter | Sumpf Luftbefeuchter |
| CM2 | Behälter | Sumpf Messkolonne |
| GP1 | Pumpe | Pumpe Luftbefeuchter |
| GP2 | Pumpe | Pumpe Messkolonne |
| GQ | Gebälse | Gebälse |
| H1 | Kolonne | Luftbefeuchter |
| H2 | Kolonne | Messkolonne |
| HQ1 | Filter | Drahtgestrick-Tropfenabscheider Luftbefeuchter |
| HQ2 | Filter | Drahtgestrick-Tropfenabscheider Messkolonne |
| HW | Mischer | Statischer Mischer |
| SF1 | Signalverarbeitung | Steuerung Pumpe Luftbefeuchter |
| SF2 | Signalverarbeitung | Steuerung Pumpe Messkolonne |
| SF3 | Signalverarbeitung | Steuerung Gebälse |

Im Versuchsbetrieb durchströmt vorbereitetes Gas die Messkolonne (H2) und verlässt diese nach Passieren des Flüssigkeitsverteilers und des Tropfenabscheiders (HQ2) am Kolonnenkopf. Gleichzeitig wird die eingebaute Packung von oben berieselt. An der Packungsoberfläche bilden sich Flüssigkeitsfilme und Rinnsale aus, die mit entgegenströmendem Gas in Kontakt stehen. Nach Durchströmen der Packung wird die Flüssigkeit im Sumpf (CM2) aufgefangen.

Das Modul zur Eintrittsgasvorbereitung besteht im Wesentlichen aus einer Packungskolonne (H1) zur Befeuchtung angesaugter Umgebungsluft (1) mit deionisiertem Wasser. Dadurch wird der Verdunstungsverlust in der nachgeschalteten Messkolonne minimiert und somit für gleichmäßige Versuchsbedingungen gesorgt. Der befeuchtete Gasstrom verlässt den Luftbefeuchter (H1) durch einen Tropfenabscheider (HQ1) und strömt in der Verbindungsleitung weiter in Richtung Messkolonne (H2). Vor Eintritt in die Messkolonne befindet sich in dieser Leitung ein statischer Mischer (HW). Die Verbindungsleitung mündet schließlich in einen Gasverteiler, welcher als horizontal in das untere Ende

der Messkolonne (H2) ragendes Rohr ausgeführt ist. Die Austrittsöffnung befindet sich an dessen Unterseite.

Flüssigkeit kann im geschlossenen Kreislauf über die Messkolonne (H2) und den Sumpf (CM2) gefördert werden. Soll die eingebaute Packung stets mit frischer Flüssigkeit berieselt werden, ist auch ein Einwegbetrieb möglich. An beiden Versuchsständen werden zur Flüssigkeitsaufgabe in Messkolonnen (H2) Verteiler mit Überlaufrohren verwendet. Der Flüssigkeitsverteiler am Versuchsstand V-422 hat eine Tropfstellendichte von rund 128 Stellen/m² (18 Tropfstellen) und ist für Berieselungsdichten bis zu 60 m h⁻¹ geeignet. Jener am V-150 weist eine höhere Tropfstellendichte von rund 226 Stellen/m² (4 Tropfstellen) auf und ist für Berieselungsdichten bis zu 90 m h⁻¹ geeignet.

In der Gas-Verbindungsleitung zwischen Luftbefeuchter (H1) und Messkolonne (H2) besteht die Möglichkeit zur Einspeisung von SO₂ über ein Düsenrohr.

Nach Austritt aus der Messkolonne (H2) befindet sich am Ende der Gasleitung das Gebläse (GQ). Dieses erzeugt die Gasströmung durch die Anlage und befördert diese (2) sicher ins Freie. Wie aus Abbildung 3 hervorgeht, sind die Gebläse der Anlagen saugseitig angeordnet, wodurch ein Austritt schädlicher Gase über Undichtheiten im Normalbetrieb verhindert ist.

Zu untersuchende Packungen werden in der Messkolonne (H2) zur vertikalen Positionierung auf als Kreuzstegringen ausgeführten Tragrosten eingebaut. Am Versuchsstand V-150 ist dies ohne Tragroste möglich. Ein sicherer Halt untersuchter Metallpackungen im Kolonnenquerschnitt wird durch eine Übergangspassung mithilfe der Randabweiser gewährleistet. Niederhalteroste werden nicht eingesetzt.

Am Versuchsstand V-422 ist für Untersuchung unterschiedlicher Packungshöhen zusätzlich zu einer Messkolonne mit einer Rohrlänge von rund 2 m eine kürzere von ca. 0,8 m vorhanden. Ein am Versuchsstand V-150 installierter höhenverstellbarer Flüssigkeitsverteiler lässt hingegen eine beliebige Reduzierung von Packungshöhen bei Verwendung derselben Messkolonne mit ca. 1 m Rohrlänge zu. Die Höhenverstellbarkeit des Flüssigkeitsverters am größeren Versuchsstand (V-422) ist dagegen auf die Einhaltung eines maximalen Abstands zur Packungsoberkante von 5 cm eingeschränkt.

3.1.2 Einrichtungen zur Messgas- und Flüssigkeitsprobenentnahme

Zur Analyse der CO₂- beziehungsweise SO₂-Gaskonzentration können Gasentnahmesonden aus rostfreiem Stahl an dafür vorgesehenen Stellen horizontal in die Messkolonne eingeführt und montiert werden. So eingebaute Rohgassonden befinden sich an beiden Versuchsständen zentral im nach unten offenen Gaseinleitrohr. Die Einbauposition der Reingassonde am V-422 befindet sich oberhalb des Flüssigkeitsverters und ist wie die Rohgassonden als Rohr mit einem Durchmesser von ca. 6 mm ausgeführt. Am Versuchsstand V-150 befindet sich die Einbaustelle der Reingassonde aus Platzgründen zwischen Packungsoberkante und Flüssigkeitsverteilteropf, ohne dabei direkt von oben berieselt werden zu können. Um eine einphasige Gasentnahme an dieser Stelle zu gewährleisten, ist diese Sonde als Doppelmantelrohr mit versetzten Öffnungen an den Rohrmänteln und Abweisblechen ausgestattet. Die Sonden sind über beheizte Entnahmeleitungen mit dem Probenahmesystem (CSS-V) des Gasanalysators verbunden. Durch die Beheizung der etwa 5 m langen Leitungen wird eine potentiell darin auftretende, die Messung verfälschende Kondensation verhindert.

Zur Entnahme von Flüssigkeitsproben über und unter der Packung sind in der Messkolonne am Versuchsstand V-422 horizontal bis zur Kolonnenmitte reichende halbschalenförmige Rinnen an Stützen der Kolonnenwand installierbar. Diese Auffangrinnen sind mit Entnahmeleitungen verbunden, welche mithilfe von Absperrhähnen eine manuelle Probenahme ermöglichen. Am V-150 ist über dem Gasverteiler eine Auffangschale zur Entnahme von Flüssigkeitsprobenahme von aus Packungen abfließender Flüssigkeit montiert. Direkt an der Kolonneninnenwand herabfließende Flüssigkeit wird von dieser nicht erfasst. Aus Platzgründen ist die Entnahme von Flüssigproben am V-150 oberhalb der Packung über eine direkt mit dem Topf des Flüssigkeitsverteilers verbundene Entnahmeleitung gelöst.

3.1.3 Messtechnik

Die an den Versuchsständen eingesetzte Messtechnik ist in Tabelle 2 dieses Kapitels angeführt. Da der Gasanalysator eine zentrale Rolle in dieser Arbeit einnimmt, wird auf diesen in einem eigenen Abschnitt detailliert eingegangen. Ergänzende Informationen zur installierten Messtechnik sind in den Arbeiten von Pesendorfer (2018) [14], Haushofer (2020) [15] und Baumfrisch [32] enthalten.

Tabelle 2: Eingesetzte Messtechnik an den Versuchsständen.

| Messgröße | Messprinzip |
|----------------------------------|--|
| Flüssigkeits-Volumenstrom | Trennung bewegter Ladungen in einem Magnetfeld |
| Gas-Volumenstrom | V-422: Ultraschall; V-150: Kalorimetrie |
| Druckverlust | Piezoresistive Druckmessung |
| Flüssigkeitsstand | Radar |
| Gas- und Flüssigkeits-Temperatur | Thermoelektrischer Effekt |
| CO ₂ -Konzentration | Nichtdispersive Infrarotspektroskopie |
| SO ₂ -Konzentration | Nichtdispersive Infrarotspektroskopie |

Gasanalysator:

Die Schwefel- und Kohlenstoffdioxidkonzentrationsmessung erfolgt in den Versuchen dieser Arbeit mithilfe eines Messgeräts des Modells EL3020 GAD8 vom Hersteller Asea Brown Boveri (ABB). Dieses ist mit einem URAS 26-Modul¹ ausgestattet. Dabei handelt es sich um einen Gasanalysator, welcher das Messprinzip der nicht-dispersiven Infrarotspektroskopie (NDIR) nutzt [33].

Die Funktionsweise des Gasanalysators ist nachfolgend in Anlehnung an Schmidt (2003) [34] beschrieben. Das Messprinzip beruht darauf, dass Gase wie beispielsweise CO₂ und SO₂ in molekulspezifischen Wellenlängenbereichen Infrarotstrahlung verstärkt absorbieren. Dies ist auf Rotation und Schwingung der Gasmoleküle, angeregt durch diese Strahlung zurückzuführen. Im Messgerät strömt kontinuierlich Gas (Analyseprobe) durch eine Küvette und wird dabei von einer Breitband-Infrarotstrahlungsquelle mit konstanter Intensität durchstrahlt. An der gegenüberliegenden Seite zur Strahlungsquelle befindet sich vor der Empfängereinheit ein optischer Filter. Dieser reduziert das transmittierte Breitband-Infrarotspektrum auf den charakteristischen Absorptions-

¹ Die Abkürzung URAS steht für Ultrarotabsorptionsschreiber [38].

Wellenlängenbereich des Analyten. Der Empfänger ist mit einem absorbierenden Gas gefüllt und in sich geschlossen. Die den optischen Filter passierende Strahlung bewirkt eine Erhöhung der Temperatur des im Empfänger eingeschlossenen Gases. Dies führt folglich zu einer Druckänderung in der Empfängereinheit. Der Kammerdruck wird über eine Membran und einen Analog-Digital-Umsetzer in ein Messsignal umgewandelt. Befindet sich in der Messküvette kein Analyt, kommt es zu einem maximalen Kammerdruck, da das reduzierte Spektrum im Strahlengang durch die Küvette mit Ausnahme von Quereinflüssen anderer Gase keine Absorption erfährt. Eine steigende Konzentration des Analyten in der Messküvette bewirkt demzufolge einen verringerten Kammerdruck. Aufgrund der beschriebenen Funktionsweise werden solche Empfänger als opto-akustisch bezeichnet. Die Strahlungsquelle emittiert nicht kontinuierlich, sondern gemäß einer bestimmten Modulation. Dies führt in der Empfängereinheit zu einem periodischen, kapazitiv messbaren Signal. Variationen von Gasanalysatoren unterscheiden sich zum Beispiel in der Anzahl der Messkanäle, der Verwendung von Vergleichsküvette und der Anzahl der Kammern in der Empfängereinheit. Der Einfluss anderer Gase mit überlagernden Absorptionsspektren als dem Analyt wird bei der Kalibration berücksichtigt und kompensiert.

In dieser Arbeit werden der Kohlenstoffdioxid- und Schwefeldioxidgehalt von Gasströmen gemessen. Diesbezügliche Absorptionsspektren sind im für den Gasanalysator relevanten Wellenlängenbereich in Abbildung 4 dargestellt. Darin sind die charakteristischen Absorptionsspitzen von CO_2 und SO_2 erkennbar.

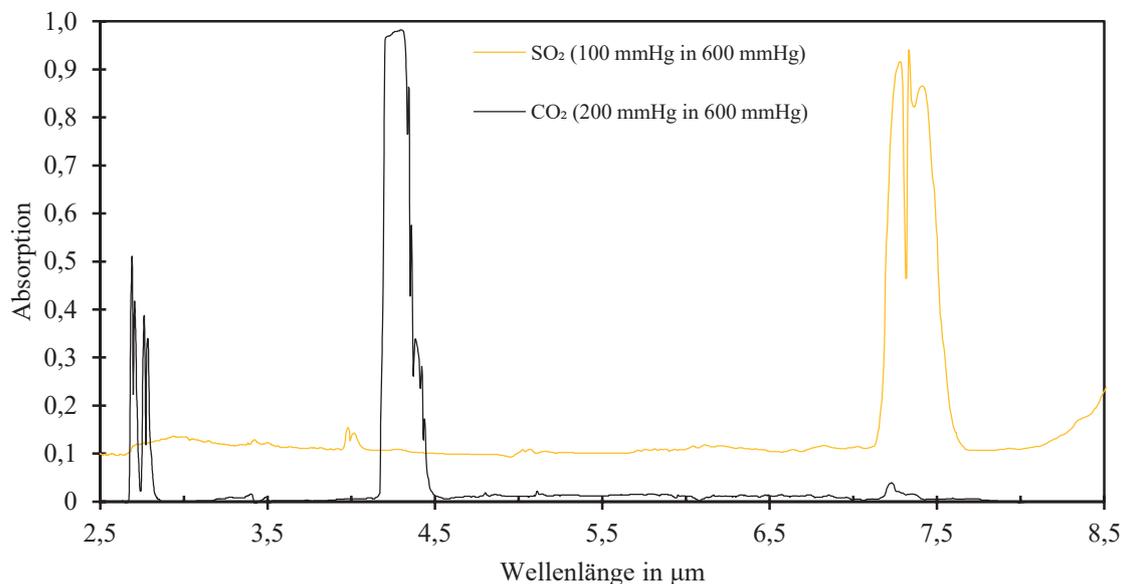


Abbildung 4: Absorptionsspektren von CO_2 [35] und SO_2 [36].

Abbildung 4 ist auf Basis von veröffentlichten Daten des National Institute of Standards and Technology (NIST) [35, 36] erstellt worden.

Um den Gasanalysator mit einem geeigneten und kontinuierlichen Gasstrom zu versorgen, ist diesem ein separates Gerät vorgeschaltet. Bei diesem handelt es sich um ein Messgasaufbereitungsmodul des

Herstellers M&C (Sampling-System CSS-V) [37]. Damit wird einerseits ein Messgasstrom mithilfe einer Membranpumpe erzeugt und andererseits auf eine konstante Temperatur von 5 °C ($\pm 0,1$ °C) gekühlt. Allfällig entstehendes Kondensat wird daraus umgehend abgepumpt. Um den Gasanalysator bei einem Störfall vor Flüssigkeit in der Eintrittsleitung zu schützen, ist diese mit einem sich bei Flüssigkeitskontakt schließenden Filter ausgestattet.

Der verwendete Gasanalysator ist bereits vom Hersteller kalibriert. Zur Überprüfung der Kalibration werden Prüfgase verwendet.

Zur Aufzeichnung von Messwerten des Gasanalysators ist dieser mit einem Rechner verbunden. Messwertverläufe werden für Anwendungen dieser Arbeit in einem sekundlichen Intervall aufgezeichnet.

3.2 Untersuchte Packungsgeometrien

Im Zuge dieser Arbeit werden vier Packungsgeometrien für Kolonneninnendurchmesser von jeweils 422 mm und 150 mm untersucht. Fluiddynamische Eigenschaften dieser Packungen sind in den Versuchsständen V-422 und V-150 bereits vor Beginn dieser Arbeit bestimmt worden. Packungen gleicher Geometrie unterscheiden sich dabei für die Versuchsstände einzig in ihrem Durchmesser. Das heißt, weder Plattendicken, Kanalabstände, Dessinierungen oder Lochungen sind skaliert. Ergänzend zu den Abbildungen in diesem Abschnitt sind zu den untersuchten Packungsgeometrien in Anhang A jeweils Fotos aus drei zueinander orthogonalen Perspektiven enthalten. In Tabelle 3 ist eine Übersicht im Rahmen dieser Arbeit untersuchter Packungsgeometrien angeführt.

Tabelle 3: Übersicht untersuchter Packungsgeometrien.

| Bezeichnung | Typ | a_p m ² /m ³ | Profilierungs-Winkel | Lückengrad % |
|-------------|----------|---|----------------------|-----------------|
| RMP N 250 Y | geordnet | 250 | 45 ° | 98,8 |
| RMP N 250 X | geordnet | 250 | 60 ° | 98,7 |
| RMP SP 250 | geordnet | 250 | 45 ° - 90 ° | 98,9 |
| RSP 250Y | hybrid | 250 | 45 ° | 98 |

Drei der Packungsgeometrien wurden vom Hersteller RVT Process Equipment GmbH bereitgestellt (RMP N 250 X, RMP N 250 Y und RMP SP 250). Diese typischen geordneten Packungen sind geometrisch ähnlich zu Packungen anderer Hersteller wie Sulzer [38], Koch-Glitsch [39] oder AMACS [40].

Die vierte untersuchte Packungsgeometrie RSP 250Y, ist vom Hersteller Raschig GmbH.

Die Anzahl an eingebauten Elementen n und daraus resultierende Packungshöhen Z bei in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen sind in Tabelle 4 aufgelistet. Grundsätzlich werden einzelne

Packungselemente zueinander um 90° gedreht in den Messkolonnen eingebaut. Angegebene Packungshöhen und Elementanzahlen zur Packung RSP 250Y inkludieren teilweise zwei IDS 250X-Elemente mit jeweils 110 mm Höhe. Dies ist für zutreffende Fälle in Tabelle 4 durch das Symbol „*“ gekennzeichnet.

Tabelle 4: Dokumentation eingebauter Packungshöhen je Messverfahren und Versuchsstand.

| Packung | a_e | | | | $k_L a_e$ | | | | $k_G a_e$ | | | |
|-------------|-------|----------|-------|----------|-----------|----------|-------|----------|-----------|----------|-------|----------|
| | V-422 | | V-150 | | V-422 | | V-150 | | V-422 | | V-150 | |
| | n | Z [cm] | n | Z [cm] | n | Z [cm] | n | Z [cm] | n | Z [cm] | n | Z [cm] |
| RMP N 250 Y | 8 | 158,0 | 5 | 98,5 | 2 | 39,5 | 5 | 98,3 | 2 | 39,5 | 3 | 58,8 |
| RMP N 250 X | 6 | 131,0 | 5 | 106,0 | 2 | 43,0 | 5 | 107,0 | 2 | 44,0 | 3 | 64,5 |
| RMP SP 250 | 7 | 146,0 | 5 | 103,5 | 2 | 42,0 | 5 | 103,7 | 2 | 42,0 | 3 | 61,9 |
| RSP 250 Y | 9* | 184,0* | 5* | 91,2* | 2 | 46,0 | 5* | 91,3* | 2 | 46,0 | 4* | 67,7* |

Packungsgeometrie RMP N 250Y:

Bei der Packungsgeometrie RMP N 250Y handelt es sich um geordnete Standardpackungen des Herstellers RVT. Die Packungsgeometrie besteht aus aneinandergereihten, wellenartig profilierten Plattenelementen. Der Winkel der Profilierung beträgt 45° zur Horizontalen. Im in Abbildung 5 gezeigten Foto eines am Versuchsstand V-422 untersuchten Packungselements ist erkennbar, dass der Profilierungswinkel einer Lage zu nächsten gespiegelt ist. Packungen dieser Art kommen üblicherweise in Anwendungen mit niedriger Berieselungsdichte und erhöhtem Gasdurchsatz zum Einsatz, wenn gleichzeitig der Druckverlust gering sein soll [41].

Eigenschaften der Packungsgeometrie RMP N 250Y:

- Hersteller: RVT Process Equipment GmbH
- geometrische Oberfläche: $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [41]
- Material: Edelstahl
- Oberflächenbehandlung: dessinert und gelocht
- Randabweiser:
auf Ring punktgeschweißtes Drahtgewebe
- Neigungswinkel: 45° [41]
- Lückengrad: 98,8 % [41]
- Spezifische Masse: $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ [41]



Abbildung 5:
Frontalansicht RMP N 250Y.

Packungsgeometrie RMP N 250X:

Die Packungsgeometrie RMP N 250X des Herstellers RVT unterscheidet sich von der RMP N 250Y durch einen steileren Profilierungswinkel von 60° (cf. Abbildung 6).

Eigenschaften der Packungsgeometrie RMP N 250X:

- Hersteller: RVT Process Equipment GmbH
- geometrische Oberfläche: $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [41]
- Material: Edelstahl
- Oberflächenbehandlung: dessinert und gelocht
- Randabweiser:
auf Ring punktgeschweißtes Drahtgewebe
- Neigungswinkel: 60° [41]
- Lückengrad: 98,7 % [41]
- Spezifische Masse: $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ [41]

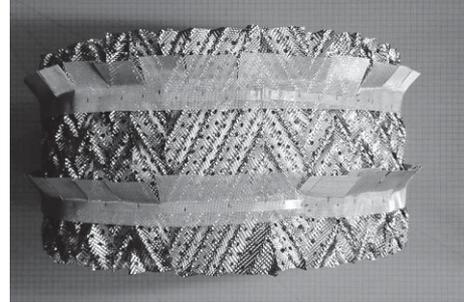


Abbildung 6:
Frontalansicht RMP N 250X.

Packungsgeometrie RMP SP 250:

Die Packungsgeometrie RMP SP 250 des Herstellers RVT wird als Hochleistungs-Packung angeboten [42]. Diese ist ebenfalls ähnlich zur Packungsgeometrie RMP N 250Y aufgebaut. Sie unterscheidet sich zu dieser in einem am Übergang zu darüber- beziehungsweise darunterliegenden Packungselementen modifizierten Profilierungswinkel. Der Neigungswinkel geht dabei von 45° in die Vertikale über und bewirkt dadurch eine weniger abrupte Umlenkung von Strömungen. Aufstauungen zwischen Packungslagen, welche einen erhöhten Druckverlust in Verbindung mit verfrühtem Fluten zur Folge haben, sollen damit verhindert werden. Abbildung 7 zeigt eine Frontalansicht eines bei Versuchen eingesetzten Packungselementes.

Eigenschaften der Packungsgeometrie RMP SP 250:

- Hersteller: RVT Process Equipment GmbH
- geometrische Oberfläche: $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [42]
- Material: Edelstahl
- Oberflächenbehandlung: dessinert und gelocht
- Randabweiser:
auf Ring punktgeschweißtes Drahtgewebe
- Neigungswinkel: 45° (exklusive des oberen und unteren Bereichs)
- Lückengrad: 98,9 % [42]
- Spezifische Masse: $106 \text{ kg}/\text{m}^3$ [42]

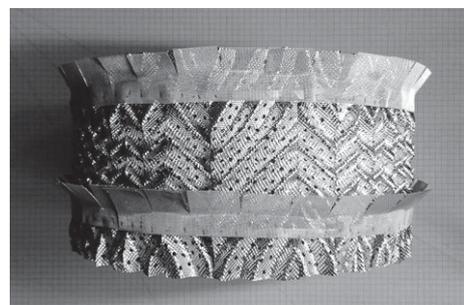


Abbildung 7:
Frontalansicht RMP SP 250.

Packungsgeometrie RSP 250Y:

Die Packungsgeometrie RSP 250Y des Herstellers Raschig (cf. Abbildung 8) unterscheidet sich in der Struktur einzelner Bleche wesentlich von den bisher erwähnten. Vom Hersteller sind jeweils zwei Packungselemente der Bezeichnung IDS 250X mit 11 cm Höhe zum Einbau als oberste Elemente mitgeliefert worden, die eine ähnliche Geometrie zur RMP N 250X aufweisen. Die Hochleistungspackungsgeometrie RSP 250Y ist aus aneinanderliegenden Bleche aufgebaut. Einzelne Lagen dieser Bleche zeichnen sich durch abwechselnd aus Vorder- und Hinterseite ragenden, bogenförmigen Stege aus. Verglichen mit den anderen Packungen soll dadurch ein leichter Übertritt der Phasen von einem Blechzwischenraum zum nächsten ermöglicht werden [43]. Die Stege sind dabei 45 ° zur Horizontalen geneigt und zu jenen anliegender Bleche gespiegelt orientiert. Wie bei der Packungsgeometrie RMP SP 250 wird auch bei dieser kein abrupter Strömungsrichtungswechsel zwischen Packungslagen erzwungen.

Eigenschaften der Packungsgeometrie RSP 250Y:

- Hersteller: Raschig GmbH
- geometrische Oberfläche: 250 m²/m³ [43]
- Material: Edelstahl
- Oberflächenbehandlung: geriffelt
- Randabweiser: Blechband
- Lückengrad: 98 % [43]

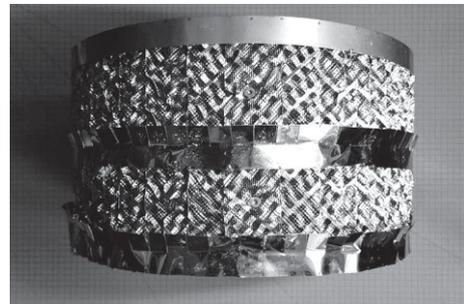


Abbildung 8:
Frontalansicht RSP 250Y.

3.3 Angewandte Messverfahren

Zur Bestimmung von Stofftransportparametern kommen in dieser Arbeit an den beiden Versuchsständen drei Messverfahren unter Verwendung ausgesuchter Stoffsysteme zur Anwendung. Diese Messverfahren werden nachfolgend in eigenen Abschnitten erläutert. Die verwendeten Stoffsysteme entsprechen den in der VDI-Richtlinie 2761 (2020) [13] zur Stofftransportparameter-Bestimmung empfohlenen Stoffsystemen 1, 2a und 3b. Dabei wird die in Kapitel 2.2 erwähnte Verlagerung der Widerstände in eine der Phasen genutzt, um einzelne Parameter einer Bestimmung zugänglich zu machen. In nachstehender Tabelle 5 ist eine Übersicht bezüglich der in den angewandten Messverfahren verwendeten Stoffsysteme angeführt.

Tabelle 5: Übersicht zur Bestimmung von Stofftransportparameter verwendeter Stoffsysteme.

| | | | |
|---|-------------------------------|--|-------------------------------|
| Stoffsystem | 1 | 2a | 3b |
| Stofftransportparameter | a_e | $k_L a_e$ | $k_G a_e$ |
| Trägergas | Luft | Luft | Luft |
| Flüssigkeit | NaOH + H ₂ O | H ₂ O | NaOH + H ₂ O |
| Übergangskomponente i | CO ₂ | CO ₂ | SO ₂ |
| Methode | Absorption (Chemisorption) | Desorption (Physi- / Chemisorption) | Absorption (Chemisorption) |
| Konzentrationsmessung (von $y_{i,o}, y_{i,u} / x_{i,o}, x_{i,u}$) | Gasphase | Flüssigkeitsphase | Gasphase |

3.3.1 Messverfahren zur Bestimmung von a_e

Das Messverfahren zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen a_e beruht auf der Verwendung des Stoffsystems 1, bei welchem atmosphärisches CO₂ aus Raumluft in 0,1-molare Natronlauge absorbiert wird. Dabei wird der gaseitige Stoffübergangswiderstand meist als vernachlässigbar klein angenommen. Rejl (2009) bezeichnet die Vernachlässigung des gaseitigen Widerstands ab Gasgeschwindigkeiten von 0,5 m/s aufgrund eines geringen Einflusses als akzeptabel [11]. Sind ausreichend freie Hydroxidionen vorhanden, dissoziiert absorbiertes CO₂ vollständig zu Carbonat-Ionen. Diese Reaktion ist bei geringer CO₂-Konzentration und einem Überschuss an Hydroxid-Ionen pseudo-erster Ordnung und praktisch irreversibel [44]. Diese Art der Reaktionskinetik ist für Hydroxidionen-Konzentrationen zwischen 0,1-1 mol L⁻¹ erwiesen [11]. Rejl et al (2009) beschreibt den Einfluss der Gasgeschwindigkeit als vernachlässigbar [11]. Auch Tsai et al (2010) stellt eine Unabhängigkeit von der Gasbelastung fest [44]. Aus Versuchsdaten zu Füllkörperschüttungen von Hoffmann et al (2007) [10] ist jedoch eine Abhängigkeit von der Gasbelastung zwischen F-Faktoren von 1-2 Pa^{1/2} erkennbar. Aus der in der Gasphase gemessenen Abscheidung von CO₂ über die Packungshöhe kann in einem ersten Schritt der auf die Gasphase bezogene volumetrische Stoffdurchgangskoeffizient berechnet werden. Über weitere Berechnungsschritte kann daraus schließlich die effektive Phasengrenzfläche ermittelt werden (cf. Kapitel 3.5.1).

3.3.2 Messverfahren zur Bestimmung von k_{La_e}

Die Bestimmung des flüssigkeitsseitigen volumetrischen (vol.) Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} erfolgt mithilfe des Stoffsystems 2a. Dabei handelt es sich um die Desorption von CO_2 aus zuvor damit angereichertem Wasser. Hier gilt die Annahme, dass die angesaugte Umgebungsluft der Freisetzung von CO_2 einen vernachlässigbar geringen (gasseitigen) Widerstand entgegensetzt. Mit steigender Berieselungsdichte nimmt k_{La_e} zu. Hingegen ist keine Abhängigkeit zur Gasbelastungen vorhanden [11]. Über die Analyse und Auswertung von während Versuchen genommener Flüssigkeitsproben wird das Ausmaß an freigesetztem CO_2 über die Packungshöhe bestimmt. Anschließend kann k_{La_e} unmittelbar berechnet werden (cf. Kapitel 3.5.2).

3.3.3 Messverfahren zur Bestimmung von k_{Ga_e}

Zur Bestimmung des gasseitigen volumetrischen (vol.) Stoffübergangskoeffizienten k_{Ga_e} kommt das Messverfahren unter Verwendung des Stoffsystems 3b zum Einsatz. Dieses zielt auf eine Minimierung des flüssigkeitsseitigen Widerstands ab. Als Waschlüssigkeit dient bei diesem Messverfahren verdünnte Natronlauge, womit SO_2 aus zuvor damit versetzter Raumluft absorbiert wird. Die Unabhängigkeit der Absorptionsrate von der Hydroxidionen-Konzentration wurde von Linek et al (1995) experimentell nachgewiesen [11]. Zumindest aufgrund der Proportionalität zur effektiven Phasengrenzfläche ist eine Abhängigkeit von k_{Ga_e} zur Berieselungsdichte gegeben. Veröffentlichte Daten von beispielsweise Hoffman et al (2007) [10], Rejl et al (2009) [11] und Wang et al (2016) [30] zeigen vor allem eine Abhängigkeit von der Gasbelastung. Die Messung der SO_2 -Absorption erfolgt in der Gasphase. Basierend auf diesen Messungen ist k_{Ga_e} direkt berechenbar (cf. Kapitel 3.5.3).

3.4 Versuchsdurchführung

Nach allgemein für Versuche dieser Arbeit zutreffenden Voraussetzungen sind nachstehend die befolgten Vorgehensweisen zur Bestimmung von a_e , k_{La_e} und k_{Ga_e} beschrieben.

Bezüglich Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes werden folgende Vorkehrungen getroffen:

- Von den durchführenden Personen wird angemessene persönliche Schutzausrüstung getragen.
- Es erfolgt eine Information aller Betroffenen über geplante Versuche und Gefahrenpotentiale.
- Arbeitsbereiche sind mit Sicherheitskennzeichnungen und -Absperrungen ausgestattet.
- Vor Inbetriebnahme erfolgt eine Kontrolle der Anlagenkonfiguration nach dem Vier-Augen-Prinzip.
- Bei Versuchsbetrieb mit Einsatz von SO_2 wird ein Gaswarngerät verwendet.
- Um einen unkontrollierten Rückstau schädlicher Gase zu vermeiden, werden Versuche nicht über den Staubereich hinaus durchgeführt.

Um für möglichst gleiche Rahmenbedingungen bei Versuchen zu sorgen, werden nachfolgend angeführte Maßnahmen ergriffen:

- Um Fehler bei repetitiven Tätigkeiten zu vermeiden und eine einheitliche Durchführung zu gewährleisten, werden vorgefertigte Checklisten benutzt. Durchführende Personen stehen im direkten Austausch, wobei der Anlagenbediener am Leitstand die Koordination innehat.
- Vor Versuchen werden die Anlagen, sowie zu untersuchende Packungselemente mit deionisiertem Wasser gespült und von diversen Rückständen oder Verschmutzungen gereinigt. Direkt anschließende gleichartige Versuche ohne Änderung der Anlagenkonfiguration sind davon ausgenommen. Gassonden, Druckstutzen und Messgasentnahmeleitungen werden während Versuchen kontinuierlich auf eingedrungene Flüssigkeit kontrolliert. Sollte dies der Fall sein, ist der Versuch zur außerordentlichen Reinigung und Spülung der betroffenen Anlagenteile zu unterbrechen. Im Anschluss kann der Versuch wiederholt beziehungsweise fortgesetzt werden.
- Nach Umbauarbeiten werden die Dichtheit der Verbindungsstellen von Bauteilen sowie eine exakte Ausrichtung der Messkolonnen (vertikal) sichergestellt.
- Beim Einbau von Packungen wird ein Abstand zwischen Flüssigkeitsverteiler-Austritt und Packungsoberkante von 5 cm eingehalten.
- Ungenutzte Stutzen an Messkolonnen werden, um eine glatte Kolonneninnenwandfläche zu gewährleisten, ausgefüllt und anschließend dicht mit Blindflanschen verschlossen.
- Die Kalibration des Gasanalysators wird vor Versuchen mittels Prüfgasen kontrolliert.
- Für in Messkolonnen eintretendes Gas wird eine relative Feuchte um 90 % sichergestellt. Dadurch wird eine Verdunstung in Messkolonnen weitgehend unterbunden, um somit praktisch konstante Mengenströme ohne Konvektionseffekte und einen möglichst isothermen Betrieb zu gewährleisten.
- Vor jedem Versuch werden eingebaute Packungen bei einer Berieselungsdichte um 40 m h^{-1} zumindest 10 Minuten lang vorberieselt. Damit sollen gute Voraussetzungen zur Benetzung geschaffen werden. Im Anschluss wird vor Versuchsbeginn eine empirisch ermittelte Abtropfzeit von zumindest 15 Minuten eingehalten, damit von der Vorberieselung bloß statischer Hold-up in der Packung verbleibt. Bei direkt aufeinanderfolgend durchgeführten gleichartigen Versuchen darf eine erneute Vorberieselung entfallen.
- Um bei Messungen Hystereseeffekte zu vermeiden, erfolgt die Einstellung von aufeinanderfolgenden Betriebszuständen ausschließlich durch Erhöhung der Belastungsparameter.

Für die Wahl eingebauter Packungshöhen (cf. Tabelle 4) sind einerseits konstruktive Einschränkungen, verfügbare Packungselemente, aber auch Grenzen der Analysemethoden ausschlaggebend. Um den Einfluss von Endeffekten gering zu halten, werden unter diesen Einschränkungen maximal mögliche Einbauhöhen verwendet.

3.4.1 Versuche zur Bestimmung von a_e

In diesem Abschnitt wird die Durchführung von Versuchen betreffend der Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen a_e an den Versuchsständen V-422 und V-150 beschrieben (cf. Kapitel 3.3.1). Die Anlagenkonfiguration der beiden Versuchsstände zur Bestimmung von a_e ist nachfolgend in Abbildung 9 als Verfahrensfliessschema gezeigt.

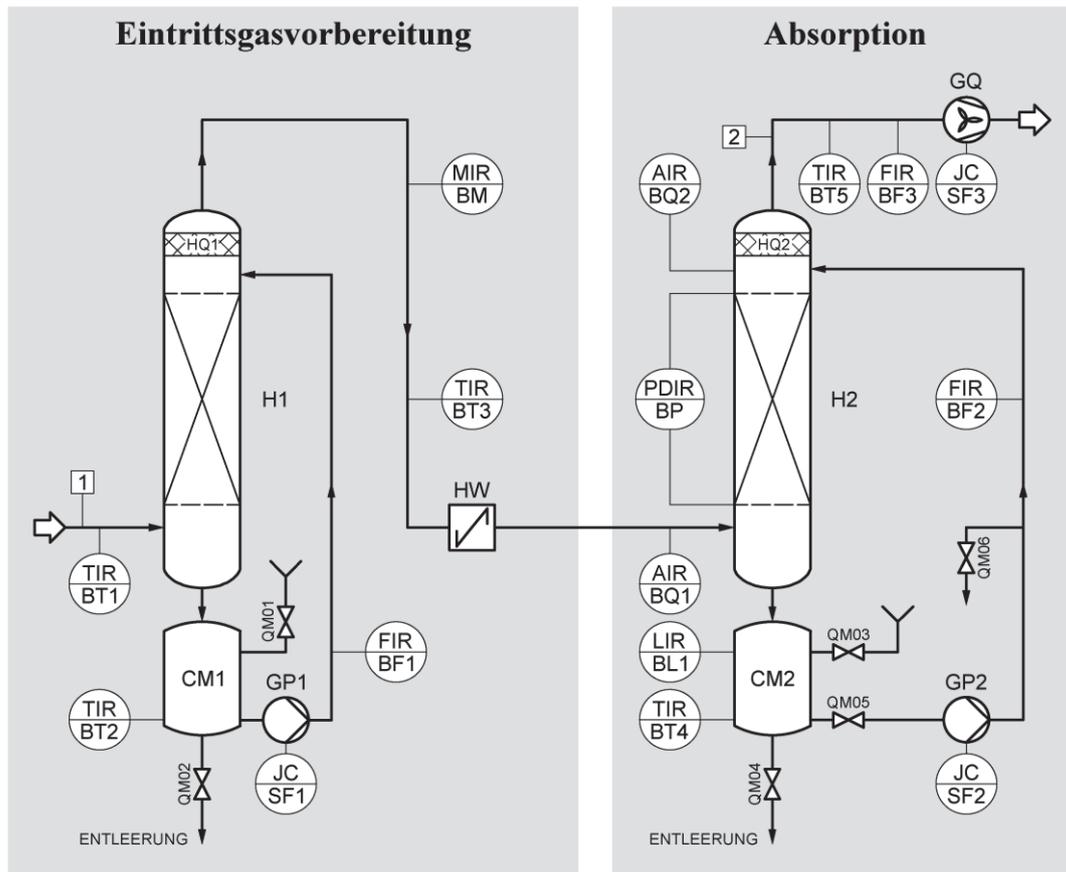


Abbildung 9: Verfahrensfliessschema der Anlagenkonfiguration zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen a_e .

In nachfolgender Tabelle 6 sind ergänzend zu Tabelle 1 des allgemeinen Schemas (cf. Kapitel 3.1) die zusätzlich in obiger Anlagenkonfiguration enthaltenen Bezeichnungen erläutert.

Tabelle 6: Ergänzende Legende zum Verfahrensfliessschema in Abbildung 9 (Bestimmung a_e).

| Bezeichnung | Art | Beschreibung |
|-------------|-----------|--|
| BQ1 | Sensor | CO ₂ -Konzentrationsmessung am Messkolonneneintritt |
| BQ2 | Sensor | CO ₂ -Konzentrationsmessung am Messkolonnenaustritt |
| QMxx | Armaturen | Absperrhähne |

Am Versuchsstand V-422 werden ca. 1,5 m und am V-150 ca. 1,0 m an Packungshöhe für Versuche zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen a_e installiert (cf. Tabelle 4). Diese Einbauhöhen sind dabei

allein durch die verfügbare Anzahl an Packungselementen beziehungsweise die Längen der Messkolonnen selbst eingeschränkt, da beim angewandten Messverfahren (Absorption von CO_2) erfahrungsgemäß keine Gefahr zu geringer Reingas-Konzentrationen besteht.

Für die Versuche wird als Waschflüssigkeit Natronlauge einer Konzentration von rund $0,10 \text{ mol L}^{-1}$ hergestellt. Dazu wird eine eingewogene Menge an festem Natriumhydroxid zuerst in deionisiertem Wasser aufgelöst und über die Armatur QM03 in den Messkolonnensumpf (CM2) überführt. Anschließend wird dieser mit deionisiertem Wasser auf ein Sollvolumen aufgefüllt. Nach Erreichen einer konstanten Flüssigkeitstemperatur im Sumpf (CM2) wird dessen Inhalt zumindest eine Stunde lang mithilfe einer Zirkulationspumpe umgewälzt, um eine gleichmäßige Durchmischung der Waschflüssigkeit zu gewährleisten (nicht in Abbildung 9 gezeigt).

Anschließend an die Vorberieselung inklusive Abtropfens wird das Gebläse (GQ) in Betrieb genommen. Sobald eine ausreichende Luftbefeuchtung erreicht ist und die Messgasentnahmeleitungen auf Betriebstemperatur sind, kann ein Versuch begonnen werden. Die Waschflüssigkeit wird dabei im Kreislauf geführt. Ein ausreichendes Überangebot an Hydroxidionen im Hinblick auf einen Abbau während des Versuchsbetriebs nachfolgender angegebener Waschflüssigkeits-Volumina ist durch Vorversuche bestätigt.

Für jede am Versuchsstand V-422 vorbereitete Charge verdünnter Natronlauge von etwa 1000 Liter werden zwei aufeinanderfolgende Versuche an einer Packung bei einer mäßigen konstanten Gasbelastung von ca. $F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$ mit variabler Berieselungsdichte innerhalb der Grenzen des Flüssigkeitsverteilers durchgeführt. Berieselungsdichten u_L werden dabei in folgender Sequenz eingestellt: 10; 20; 30; 40; 50 und 60 m h^{-1} . Durch zweifach ausgeführte Versuche soll die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachgewiesen werden.

Am Versuchsstand V-150 werden Chargen verdünnter Natronlauge von rund 50 Liter hergestellt. Auch an diesem Versuchsstand werden damit jeweils zwei Versuche hintereinander durchgeführt. Jedoch erfolgen diese bei unterschiedlichen konstanten Gasbelastungen von $F = 0,5 \text{ Pa}^{1/2}$ beziehungsweise $F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$, um einen potentiellen Einfluss von F zu zeigen. Es wird eine zu Versuchen am Versuchsstand V-422 ähnliche Sequenz aufsteigender Berieselungsdichten u_L , mit einer Obergrenze von ca. 80 m h^{-1} befolgt.

Die Messung von CO_2 -Konzentrationen an den Stellen BQ1 und BQ2 erfolgt unter Verwendung desselben Messkanals im Gasanalysator. Über manuellen Eingriff wird dafür an einem zu untersuchenden Betriebspunkt Gas abwechselnd aus der Roh- und Reingassonde entnommen. Für Auswertungen werden ausschließlich aufgezeichnete Ein- und Austrittskonzentrationen stationärer Betriebszustände berücksichtigt. Diese werden über Eingabe am Rechner des Gasanalysators während der Versuche entsprechend gekennzeichnet. Stationäre Zustände werden über die sich nach Einregulierung der Fluidvolumenströme einstellende Stabilisierung gemessener CO_2 -Konzentrationen identifiziert. Es werden für untersuchte Betriebszustände jeweils zumindest eine Minute lang stabile Ein- und Austrittskonzentrationen aufgezeichnet.

Während Versuchen werden an stationären Betriebszuständen Flüssigkeitsproben über die Entnahmemarmatur QM06 genommen. Die Hydroxidionen-Konzentration inklusive des Carbonat-Anteils dieser Proben wird entsprechend den Herstellerangaben des hierfür verwendeten automatischen Titrators (Titrino) bestimmt [45]. Zur Kontrolle der Hydroxidionen-Konzentration hergestellter Waschlösungen wird vor Versuchen eine Flüssigkeitsprobe direkt aus dem Messkolonnensumpf (CM2) in gleicher Weise analysiert.

Nach Abschluss zweier Versuchsdurchgänge wird das Absorbat neutralisiert, indem ein pH-Wert zwischen 6 und 9 durch Zugabe von Salzsäure eingestellt wird. Danach kann diese Flüssigkeit entsorgt werden.

3.4.2 Versuche zur Bestimmung von k_{La_e}

Nachfolgend ist die Versuchsdurchführung zur Bestimmung von flüssigkeitsseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} an den Versuchsständen V-422 und V-150 beschrieben (cf. Kapitel 3.3.2).

In Abbildung 10 ist die Konfiguration der Versuchsstände dargestellt, wie sie für die Bestimmung von k_{La_e} verwendet wird.

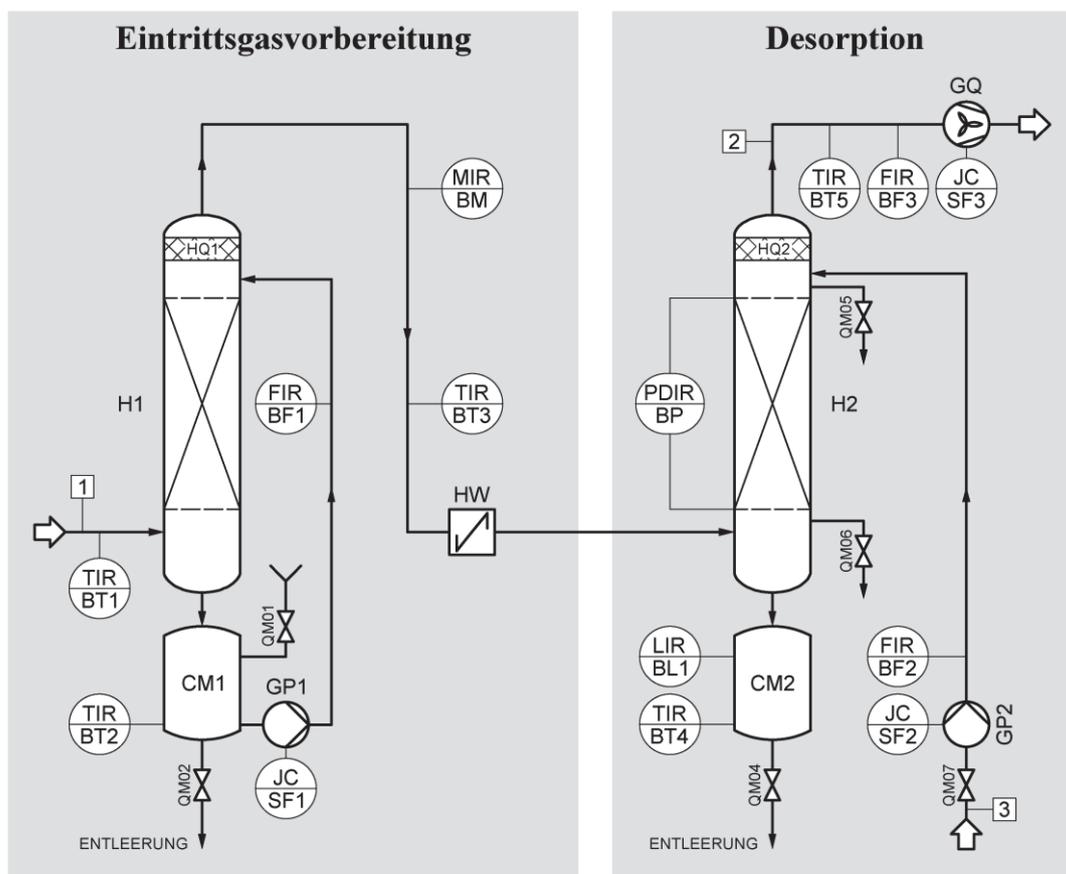


Abbildung 10: Verfahrensfliesschema der Anlagenkonfiguration zur Bestimmung flüssigkeitsseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} .

Entsprechend Abbildung 10 wird zuvor mit CO₂ angereichertes Wasser (3) im Versuchsbetrieb aus einem Vorratstank (CM3) in die Messkolonne (H2) gefördert. Aus dieser Flüssigkeit desorbiert über die Kontaktstrecke in der Messkolonne (H2) ein gewisser Anteil gelösten Kohlenstoffdioxids. Anschließend verlässt die Flüssigkeit die Anlage.

Zur Vorbereitung eintretenden Wassers (3) wird an den Versuchsständen ein separates Modul zur CO₂-Anreicherung installiert. Dessen Verfahrensfließschema ist in Abbildung 11 dargestellt.

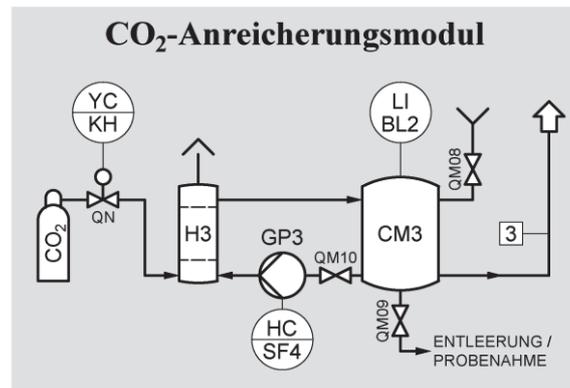


Abbildung 11: Verfahrensfließschema des CO₂-Anreicherungsmoduls zur Vorbereitung eintretender Flüssigkeit bei Desorptionsversuchen zur Bestimmung von k_{La_e} .

Die in Abbildung 10 und Abbildung 11 enthaltenen Bezeichnungen, welche nicht bereits im allgemeinen Verfahrensfließbild gemäß Tabelle 1 definiert werden, sind in Tabelle 7 beschrieben.

Tabelle 7: Ergänzende Legende zu den Schemata in Abbildung 10 und Abbildung 11 (Bestimmung von k_{La_e}).

| Bezeichnung | Art | Beschreibung |
|-------------|--------------------|---|
| 3 | Strom | Mit CO ₂ angereichertes deionisiertes Wasser |
| BL2 | Sensor | Flüssigkeitsinhaltsindikator Wassertank |
| CM3 | Behälter | Wassertank |
| GP3 | Pumpe | Blasensäulenpumpe |
| H3 | Kolonne | Blasensäule |
| KH | Signalverarbeitung | Ventilstellungsregler |
| QMxx | Armatur | Absperrhähne |
| QN | Armatur | Regelarmatur CO ₂ |
| SF4 | Signalverarbeitung | Manuelle Steuerung Pumpe |

Wie aus Versuchsergebnissen im Anhang ersichtlich ist, werden mit den am Versuchsstand V-150 verwendeten Packungshöhen von rund einem Meter bereits hohe Freisetzungsgrade erzielt. Daher wird für Versuche am V-422 die kürzere Messkolonne verwendet. Am Versuchsstand V-422 werden somit für Versuche zur Bestimmung von k_{La_e} Packungshöhen von ca. 0,4 m eingebaut

Bei der Vorbereitung der Flüssigkeit für Desorptionsversuche zur Bestimmung von $k_L a_e$ wird eine Anreicherung mit CO_2 von ungefähr $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ angestrebt. Damit sind auch bei geringen Berieselungsdichten nach Freisetzung über die Kontaktstrecke noch messbare Konzentrationen gegeben.

Am Versuchsstand V-422 werden ungefähr $1,5 \text{ m}^3$ an Flüssigkeit vorbereitet, während am V-150 rund 1 m^3 für einen Versuch ausreichend ist.

Nachfolgend ist die Funktion des CO_2 -Anreicherungsmoduls (cf. Abbildung 11) erläutert.

Der Inhalt des Wassertanks (CM3) wird mithilfe einer Pumpe (GP3) durch zwei parallel betriebene Blasensäulen (H3) geleitet. Diese Blasensäulen sind an ihren oberen Enden mit in den Tank (CM3) zurückführenden Überläufen ausgestattet. An den Böden der Blasensäulen (H3) sind neben der Verbindung zum Tank (CM3) die Anschlüsse der CO_2 -Gasleitung vorhanden. An diesen sind innerhalb der Blasensäulen Diffusoren installiert. Die Blasensäulen funktionieren somit im Gleichstrom, wobei die Geschwindigkeit von aus den Diffusoren aufsteigenden CO_2 -Gasblasen um einen Faktor von etwa 10 größer als die mittlere Flüssigkeitgeschwindigkeit in den Blasensäulen ist.

Der Vorgang zur Anreicherung dauert für gewöhnlich zumindest drei Stunden. Um eine für den Betrieb ausreichende Sättigung festzustellen wird der CO_2 -Gehalt von Flüssigkeitsproben aus dem Wassertank (CM3) analysiert. Die Analyseverfahren ist am Ende dieses Abschnitts beschrieben.

Nach Vorberieselung, Abtropfen und anschließender ausreichender Befeuchtung des Gasstroms kann ein Versuch gestartet werden.

Am Versuchsstand V-422 werden bei konstanter Gasbelastung von $F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$ Betriebszustände mit variablen Berieselungsdichten gemäß nachfolgender Sequenz eingestellt: 10; 20; 30; 40; 50 und 60 m h^{-1} . Bei Versuchen am Versuchsstand V-150 wird die folgende Sequenz eingehalten: 10; 20; 40; 60 und 80 m h^{-1} . Um die Reproduzierbarkeit zu demonstrieren, werden alle Versuche zweifach durchgeführt.

Sobald ein stationärer Betriebszustand eingestellt ist, werden Flüssigkeitsproben von ein- und austretenden Flüssigkeitsströmen über die dafür vorgesehenen Armaturen (QM05 und QM 06) an der Messkolonne (H2) entnommen. Dabei wird zuerst ausreichend Totvolumen abgelassen. Ein stationärer Betriebspunkt ist erreicht, sobald Fluidströme sowie der Druckverlust über die Packung konstant sind. Geringfügige zufällige Schwankungen dieser Größen sind mithilfe von Erfahrungswerten deutlich von Vorgängen der Einregulierung abgrenzbar.

Flüssigproben werden zur eindeutigen Identifizierbarkeit in mit Bezeichnungen versehenen Schraubgläsern (100 ml Fassungsvermögen, gereinigt und trocken) aufgefangen und verschlossen. Dabei wird darauf geachtet, möglichst wenig Luft einzuschließen.

Nach Versuchen zur Bestimmung von $k_L a_e$ verbrauchte Flüssigkeit darf ohne Vorbehandlung entsorgt werden.

Im Folgenden wird die Vorgangsweise zur Analyse während Versuchen genomener Flüssigkeitsproben beschrieben. Mithilfe von Ergebnissen dieser Analysen können flüssigkeitsseitige vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{La} gemäß Kapitel 3.5.2 berechnet werden.

Zur Bestimmung des CO₂-Gehalts von Flüssigkeitsproben wird eine an Hilliard (2008) [46] angelehnte Methode angewandt. Dabei werden Proben in ein Bad verdünnter Phosphorsäure eingebracht. Als Carbonat gelöstes CO₂ geht dabei durch Verschieben des chemischen Gleichgewichts gemäß den Reaktionsgleichungen 3-1 und 3-2 in die Gasphase über.



In weiterer Folge wird entweichendes CO₂ mit einer Trägergasströmung kontrolliert abtransportiert. Dabei wird vom Gasanalysator ein der freigesetzten Menge an CO₂ proportionales Signal registriert.

Untersuchten Betriebspunkten sind jeweils zwei Proben zugeordnet. Davon repräsentiert eine Probe in die Packung eintretende Flüssigkeit und die andere Probe die daraus austretende Flüssigkeit. Um eine potentielle Freisetzung von gelöstem CO₂ aus Proben vor Beginn der Analyse weitgehend zu unterbinden, werden die Proben unmittelbar nach Abschluss des Versuchs einer Vorbehandlung unterzogen. Dazu werden jeweils 10 ml der Flüssigkeitsproben mit 3 ml 0,5 molarer Natronlauge in Teströhrchen überführt. Diese werden anschließend mit minimalem Lufteinschluss verschlossen, geschwenkt und eindeutig beschriftet.

Der Versuchsaufbau zur Analyse des CO₂-Gehalts von Flüssigkeitsproben mittels saurer Austreibung ist in der nachfolgenden Abbildung 12 skizziert.

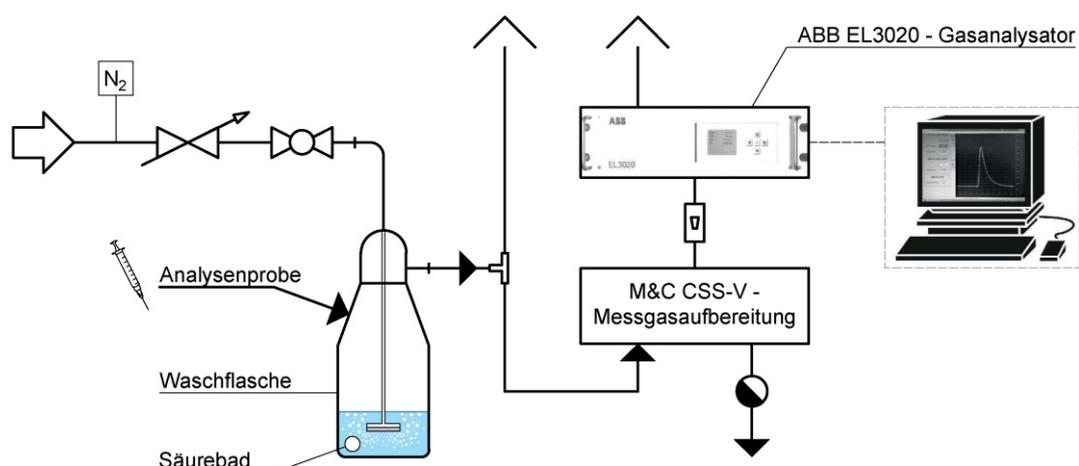


Abbildung 12: Skizze des Versuchsaufbaus zur Analyse des CO₂-Gehalts von Flüssigkeitsproben.

Das Säurebad befindet sich beim in Abbildung 12 dargestellten Versuchsaufbau in einer Waschflasche, worin eine Fritte zur Einleitung des Trägergases eintaucht. Als Säure wird eine Lösung mit 39 % Massenanteil H_3PO_4 ($\sim 5 \text{ mol L}^{-1}$) verwendet, um einerseits einen ausreichenden Überschuss an Oxonium-Ionen und andererseits eine geeignete Viskosität des Säurebads zu gewährleisten.

Als Trägergas wird Stickstoff der Reinheit 5.0 ($\geq 99,999\%$) eingesetzt. Mithilfe eines Druckminderers wird für Analysen einmalig ein Volumenstrom aus der N_2 -Gasflasche durch die Waschflasche eingestellt. Dadurch wird ausgetriebenes CO_2 in Richtung des Messgerätes transportiert.

Das Analysegerät erfordert die Durchströmung mit einem geeigneten und konstanten Volumenstrom, welcher vom Probenahmesystem CSS-V gewährleistet wird. Ein T-Stück zwischen Waschflasche und Probenahmesystem erlaubt es, überschüssigen Gasstrom abzuleiten. Um das Ansaugen von Falschluff über dieses T-Stück zu verhindern, wird ein ausreichend großer Trägergasstrom eingestellt.

Zur Analyse einer vorbehandelten Probe wird ein Teil davon mittels einer Spritze in die Waschflasche eingebracht. Injizierte Probenmassen werden durch Vor- und Rückwiegen der Spritzen bestimmt. Vor Verwendung von Spritzen werden diese dreifach mit destilliertem Wasser gespült.

Einem Betriebszustand zugeordnete Flüssigkeitsproben werden stets direkt nacheinander analysiert. So wird ein Fehlereinfluss durch langfristige Änderung des Trägergasstroms aufgrund einer Abnahme des Vordrucks minimiert. Nach jeder vierten Flüssigkeitsprobe wird eine Referenzlösung bekannter CO_2 -Konzentration analysiert.

Mit dem Gasanalysator ist ein Rechner zur Messwertaufzeichnung verbunden. Registrierte Signalverläufe entsprechender Flüssigkeitsproben werden zur eindeutigen Identifizierbarkeit bei ihrer Aufzeichnung mit Metadaten versehen.

Um die Unsicherheit der beschriebenen Methode zur Flüssigkeitsprobenanalyse abzuschätzen, wird eine Referenzprobe bekannter CO_2 -Konzentration mehrfach in dieser Weise analysiert und anschließend die Abweichung der Ergebnisse festgestellt.

3.4.3 Versuche zur Bestimmung von k_{GA_e}

Dieser Abschnitt beschreibt die Durchführung von Versuchen betreffend der Bestimmung gaseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{GA_e} (cf. Kapitel 3.3.3) an den Versuchsständen V-422 und V-150.

Die bei Versuchen zur Bestimmung von k_{GA_e} verwendete Anlagenkonfiguration der beiden Versuchsstände ist in Abbildung 13 als Verfahrensfliesschema dargestellt.

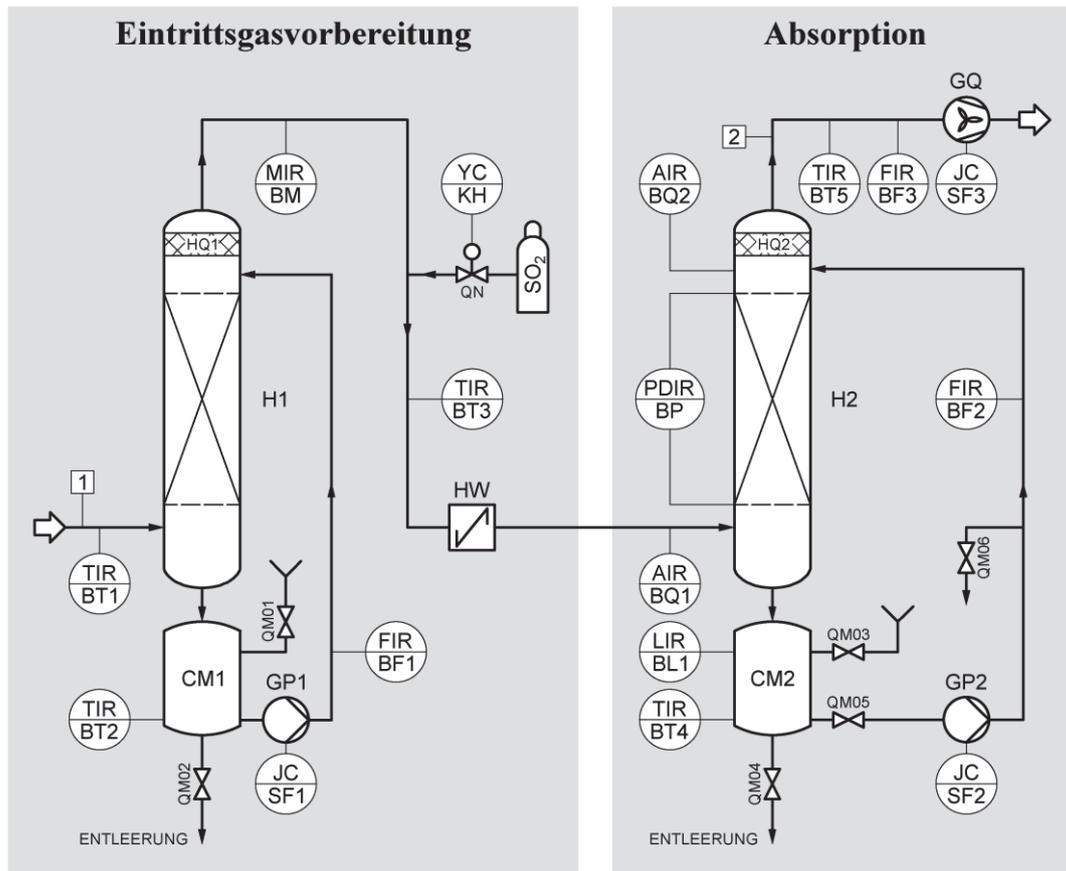


Abbildung 13: Verfahrensfliesschema der Anlagenkonfiguration zur Bestimmung gaseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{GA_e} .

Jene Bezeichnungen aus Abbildung 13, welche nicht schon im Kapitel 3.1 definiert sind, werden in Tabelle 8 beschrieben.

Tabelle 8: Ergänzende Legende zum Verfahrensfliesschema in Abbildung 13 (Bestimmung k_{GA_e}).

| Bezeichnung | Art | Beschreibung |
|-------------|--------------------|--|
| BQ1 | Sensor | SO ₂ -Konzentrationsmessung am Messkolonneneintritt |
| BQ2 | Sensor | SO ₂ -Konzentrationsmessung am Messkolonnenaustritt |
| KH | Signalverarbeitung | Ventilstellungsregler |
| QMxx | Armaturen | Absperrhähne |
| QN | Armaturn | Regelarmatur SO ₂ |

Beim Messverfahren zur Bestimmung k_{Ga_e} treten hohe Absorptionsgrade auf. Zur Gewährleistung noch messbarer SO_2 -Austrittskonzentrationen ist es daher erforderlich, für diesbezügliche Versuche reduzierte Packungshöhen einzusetzen. Am Versuchsstand V-422 werden somit ca. 0,4 m eingebaut, während am V-150 etwas höhere um 0,6 m verwendet werden.

Für Versuche wird als Waschflüssigkeit Natronlauge einer Konzentration um $0,3 \text{ mol L}^{-1}$ hergestellt. Auf Basis von Erfahrungswerten ist diese Konzentration für zumindest zwei Versuche im Kreislaufbetrieb ausreichend. Die Herstellung der Natronlauge erfolgt in analoger Weise zu Kapitel 3.4.1.

Im Anschluss an die Vorberieselung kann nach Abwarten der Abtropfzeit und darauffolgender Befeuchtung des Eintrittsgasstroms ein Versuch begonnen werden.

Dem Gasstrom wird nach Austritt aus dem Luftbefeuchter (H1) SO_2 zugesetzt. Dabei wird einheitlich eine SO_2 -Eintrittskonzentration von ca. 1000 ppm (volumetrisch) für die Messkolonne (H2) an der Messstelle BQ1 eingeregelt. Diese Eintrittskonzentration wird aufgrund der gegebenen Möglichkeiten an den Versuchsständen ausgewählt. Die Einstellung der SO_2 -Regelarmatur QN erfolgt am V-422 manuell und am V-150 mithilfe eines Massendurchflussreglers.

Aufgrund des überwiegenden Einflusses der Gasbelastung auf k_{Ga_e} werden Versuche bei konstanter Berieselungsdichte von 10 m h^{-1} beziehungsweise auch 30 m h^{-1} und variabler Gasbelastung durchgeführt. Es wird dabei an beiden Versuchsständen folgende Sequenz an F-Faktoren eingestellt: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 und $3,0 \text{ Pa}^{1/2}$.

Nach Einstellung eines stationären Betriebszustands erfolgt die Messung von SO_2 -Konzentrationen an den Messstellen BQ1 und BQ2 über den gleichen Messkanal des Gasanalysators. Dazu wird manuell zwischen den entsprechenden Entnahmeleitungen umgeschaltet. Ein stationärer Betriebszustand ist durch konstante Belastungsgrößen und einer stabilen SO_2 -Eintrittskonzentration gekennzeichnet. SO_2 -Konzentrationen werden zumindest eine Minute lang aufgezeichnet und eindeutig den untersuchten Betriebszuständen zugeordnet.

Beim Herunterfahren der Anlage werden aus Sicherheitsgründen zuerst die SO_2 -Dosierung und anschließend die Berieselung beendet. Erst nach Abführen von in der Anlage verbliebenen Schwefeldioxid wird das Gebläse abgeschaltet. Am Ende von Versuchen wird außerdem die Hydroxidionen-Konzentration der Waschlösung kontrolliert.

Zur Entsorgung der Waschflüssigkeit muss diese zuerst mithilfe von Salzsäure neutralisiert werden (pH-Wert 6-9).

3.5 Versuchsdatenauswertung

In den folgenden Abschnitten sind die Methoden dieser Arbeit zur Auswertung von Versuchsdaten beschrieben.

3.5.1 Effektive Phasengrenzflächen a_e

Zur Bestimmung von a_e kann in einem ersten Schritt mittels Gleichung 3-4 aus über und unter einer Packung gemessenen CO_2 -Konzentrationen der gaseitige Stoffdurchgangskoeffizient $k_{OG}a_e$ berechnet werden (cf. Gleichung 3-3). Hierzu werden über stabile Messintervalle gemittelte CO_2 -Konzentrationen (y) verwendet.

$$(k_{OG} \cdot a_e) = \frac{u_G}{Z} \cdot \ln \left(\frac{y_{\text{CO}_2,u}}{y_{\text{CO}_2,o}} \right) \quad (3-4)$$

Um in weiterer Folge a_e berechnen zu können, muss zuerst k_{OG} bekannt sein. Dieser gaseitige Stoffdurchgangskoeffizient (k_{OG}) ist über Gleichung 3-5 definiert. Entsprechend dem bei den Versuchen angewandten Messverfahren ist darin der gaseitige Stoffübergangswiderstand k_G^{-1} vernachlässigbar.

$$\frac{1}{k_{OG}} = \frac{1}{k_G} + \frac{m \cdot \tilde{\rho}_G}{E \cdot k_L \cdot \tilde{\rho}_L} \approx \frac{m \cdot \tilde{\rho}_G}{E \cdot k_L \cdot \tilde{\rho}_L} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{k'_G} \quad (3-5)$$

Über die Oberflächenerneuerungstheorie ist im vorliegenden Fall eine vereinfachte Lösung des in obiger Gleichung definierten k'_G gemäß Gleichung 3-6 möglich [28]. Darin ist c_{OH^-} die Hydroxidionen-Konzentration.

$$k'_G = \frac{\sqrt{c_{\text{OH}^-} \cdot D_{\text{CO}_2,L} \cdot k_{\text{OH}^-}}}{K_{\text{CO}_2,L}} \cdot R \cdot T_{\text{sys}} \quad (3-6)$$

Als Bezugstemperatur zur Berechnung von Diffusionskoeffizienten, Henry-Flüchtigkeitskonstanten sowie des Stoffdurchgangskoeffizienten k'_G wird eine mittlere Temperatur T_{sys} zwischen Gas und Flüssigphase nach Gleichung 3-7 definiert. Laut Tsai (2010) [26] und Song (2017) [28] ergeben sich damit bei wesentlich von der Flüssigkeitstemperatur abweichenden Umgebungstemperaturen zutreffendere Ergebnisse für a_e .

$$T_{\text{sys}} = \left[\frac{(T_{G,u} + T_{G,o})}{2} + T_L \right] \cdot \frac{1}{2} \quad (3-7)$$

Schließlich lässt sich nach Gleichung 3-8 a_e durch Division mit k'_G berechnen.

$$a_e = \frac{(k_{OG} \cdot a_e)}{k_{OG}} \approx \frac{(k_{OG} \cdot a_e)}{k'_G} \quad (3-8)$$

Zur Berechnung der Geschwindigkeitskonstante, des Diffusionskoeffizienten und der Henry-Flüchtigkeitskonstanten in Gleichung 3-6 werden die nachfolgend angeführten Korrelationen verwendet.

Die Geschwindigkeitskonstante ergibt sich mithilfe der Korrelationen von Pohorecki et al (1988) [47] in den Gleichungen 3-9 und 3-10.

$$\log_{10} \left(k_{\text{OH}^-} / k_{\text{OH}^-}^{\infty} \right) = 0,221 \cdot I - 0,016 \cdot I^2 \quad (3-9)$$

$$\log_{10}(k_{\text{OH}^-}^{\infty}) = 11,895 - 2382/T_L \quad (3-10)$$

Über Gleichung 3-11 ist ein Zusammenhang zwischen dem Diffusionskoeffizienten in der Lauge und jenem reinen Wassers über die dynamischen Viskositäten bei konstanter Temperatur gegeben [47, 48].

$$(D_{\text{CO}_2, \text{L}} \cdot \mu_L)_T = (D_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}} \cdot \mu_{\text{H}_2\text{O}})_T = \text{konstant} \quad (3-11)$$

Die Korrelation zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten in reinem Wasser ist in Gleichung 3-12 angeführt [47, 48].

$$\log_{10}(D_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}}) = -8,1764 + \frac{712,5}{T_{\text{sys}}} - \frac{2,591 \cdot 10^5}{(T_{\text{sys}})^2} \quad (3-12)$$

Zur Berechnung der Viskosität von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur wird eine Korrelation von Tsai (2010) [26] gemäß Gleichung 3-13 verwendet.

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 0,02414 \cdot 10^{(247,8/(T_L - 140))} \quad (3-13)$$

Um die Viskosität verdünnter Natronlauge zu berechnen, wird Gleichung 3-14 nach Pohorecki et al (1988) [48] angewandt.

$$\log_{10}(\mu_L) = \frac{878,159}{T_L} - 3,0254 + 0,11029 \cdot (c_{\text{OH}^-} - 2 \cdot c_{\text{CO}_3^{2-}}) + 0,08947 \cdot \left(\frac{c_{\text{CO}_3^{2-}}}{\frac{c_{\text{OH}^-}}{2} + c_{\text{CO}_3^{2-}}} \right) \quad (3-14)$$

Henry-Flüchtigkeitskonstanten entsprechen dem Kehrwert von Henry-Konstanten gemäß (cf. Gleichung 3-15).

$$K_{\text{CO}_2, \text{L}} = H_{\text{CO}_2, \text{L}}^{-1} \quad (3-15)$$

Zur Berechnung von Henry-Konstanten in Wasser und Natronlauge werden die Gleichungen 3-16 und 3-17 nach Pohorecki et al (1988) [47, 48] genutzt.

$$\log_{10} \left(\frac{H_{\text{CO}_2, \text{L}}}{H_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}}} \right) = - \sum I_i \cdot h_i \quad (3-16)$$

$$H_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}} = 9,1229 - 5,9044 \cdot 10^{-2} \cdot T_{\text{sys}} + 7,8857 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{\text{sys}})^2 \quad (3-17)$$

Der Term auf der rechten Seite in Gleichung 3-16 wird entsprechend Gleichung 3-18 nach Tsai (2010) [26] berechnet.

$$\sum I_i \cdot h_i = I_{\text{NaOH}} \cdot (h_{\text{Na}^+} + h_{\text{OH}^-} + h_{\text{CO}_2}) + I_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \cdot (h_{\text{Na}^+} + h_{\text{CO}_3^{2-}} + h_{\text{CO}_2}) \quad (3-18)$$

Die einzelnen Beiträge von h obiger Gleichung weisen folgende Werte auf:

$$h(\text{Na}^+) = 0,091 \text{ L mol}^{-1}, h(\text{OH}^-) = 0,066 \text{ L mol}^{-1}, h(\text{CO}_3^{2-}) = 0,021 \text{ L mol}^{-1} [48].$$

Für $h(\text{CO}_2)$ wird die Korrelation in Gleichung 3-19 nach Tsai (2010) [26] verwendet.

$$h_{\text{CO}_2} = 4,364 \cdot 10^{-7} \cdot (T_{\text{sys}}[\text{°C}])^3 - 3,297 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{\text{sys}}[\text{°C}])^2 + 1,204 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{sys}}[\text{°C}] - 6,847 \cdot 10^{-3} \quad (3-19)$$

Zur Berechnung von a_e ohne Vernachlässigung des gaseitigen Widerstands k_G^{-1} in Gleichung 3-5 werden in dieser Arbeit bei passenden Betriebszuständen ermittelte Ergebnisse zu $k_{G a_e}$ herangezogen. Dazu werden ermittelte $k_{G a_e}$ durch ein geschätztes a_e dividiert, woraus k_G folgt. Dieses k_G ist entsprechend dem Messverfahren zur Bestimmung von $k_{G a_e}$ auf die Übergangskomponente SO_2 bezogen. Zur Konvertierung von k_G in einen auf die Übergangskomponente CO_2 bezogenen gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten wird ein Zusammenhang über Diffusionskoeffizienten der Gasphase entsprechend der Grenzschichttheorie nach Gleichung 3-20 genutzt [13].

$$\frac{k_{\text{CO}_2, G}}{k_{\text{SO}_2, G}} = \left(\frac{D_{\text{CO}_2, G}}{D_{\text{SO}_2, G}} \right)^{2/3} \quad (3-20)$$

Über den Zusammenhang in Gleichung 3-21 wird anschließend k'_{OG} berechnet.

$$\frac{1}{k'_{OG}} = \frac{1}{k_{\text{CO}_2, G}} + \frac{1}{k'_G} \quad (3-21)$$

Darin wird k'_g analog zum vorherigen Abschnitt nach Gleichung 3-6 berechnet. Die effektive Phasengrenzfläche a'_e wird darauffolgend gemäß Gleichung 3-22 berechnet.

$$a'_e = \frac{(k_{OG} \cdot a_e)}{k'_{OG}} \quad (3-22)$$

Solange die im ersten Schritt geschätzte effektive Phasengrenzfläche a_e nicht mit dem Endergebnis a'_e übereinstimmt, werden diese Schritte über neue Schätzungen für a_e bis zur Konvergenz wiederholt. Für vorliegende Betriebszustände werden geeignete $k_{G a_e}$ aus deren ermittelten zugehörigen Potenzfunktionen berechnet (cf. Kapitel 3.5.4).

Die Diffusionskoeffizienten in Gleichung 3-20 werden mithilfe von Korrelation nach Fuller et al (1965, 1966, 1969) bestimmt [49].

3.5.2 Flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$

Bei Versuchen zur Bestimmung des flüssigkeitsseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ wird von einem vernachlässigbar kleinen Widerstand in der Gasphase ausgegangen. Somit ergibt sich $k_L a_e$ ausgehend von Gleichung 2-30 nach Gleichung 3-23.

$$(k_{\text{CO}_2, \text{L}} \cdot a_e) \cong (k_{\text{OL}} \cdot a_e) = \frac{u_{\text{L}}}{Z} \cdot \ln \left(\frac{x_{\text{CO}_2, \text{o}}}{x_{\text{CO}_2, \text{u}}} \right) \quad (3-23)$$

Um das hierfür notwendige Verhältnis des CO_2 -Gehalts zwischen der Flüssigkeit über der Packung und jener unterhalb dieser zu bestimmen, werden die Aufzeichnungen der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Analyseverfahren wie im Folgenden beschrieben ausgewertet.

Im Zuge der Flüssigprobenanalyse wird für jede untersuchte Probe ein dem Gehalt an CO_2 entsprechender Messwert-Signalverlauf $f(t)$ aufgezeichnet. Das Integral (S) dieser Messwertverläufe über deren Signaldauer wird in weiterer Folge als ein dem CO_2 -Gehalt der jeweils zugehörigen Probe proportionales Maß genutzt. Zur Berechnung des Integrals von Signalfunktionen $f(t)$ wird die Trapezregel in Gleichung 3-24 mit einem Intervall Δt von einer Sekunde angewandt. Die Anzahl an Intervallen n_1 ergibt sich aus der Dauer von Beginn bis zum vollständigen Ausklang des Signals.

$$S = \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=0}^{n_1-1} (f_i + f_{i+1}) \quad (3-24)$$

Abbildung 14 zeigt einen typischen Messsignalverlauf $f(t)$ mit Darstellung des zugehörigen Integrals $S(f)$ über die Signaldauer t .

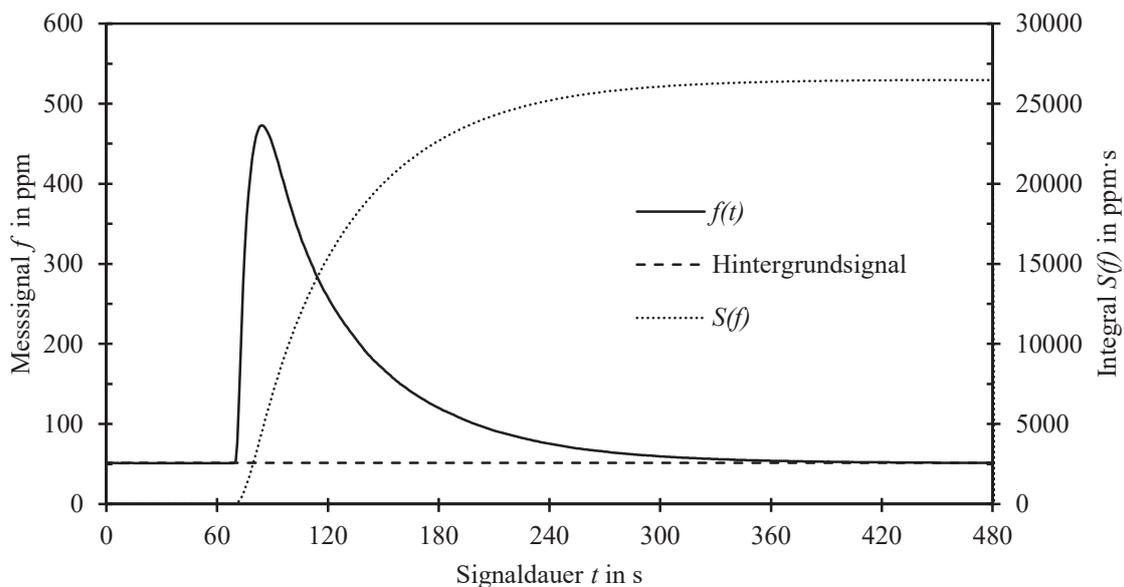


Abbildung 14: Typischer CO_2 -Konzentrationsverlauf $f(t)$ im Trägergas während der Flüssigkeitsprobenanalyse.

Mithilfe der Analyse von Referenzproben bekannter Konzentration sind die CO_2 -Gehalte untersuchter Proben auch als Konzentrationen ausdrückbar. Diese werden für die eigentliche Auswertung von $k_L a_e$ nicht verwendet. Auf diese Weise kann jedoch einerseits die Konzentration hergestellter Flüssigkeit überprüft und andererseits die Kontinuität der Konzentration während Versuchen eintretender Flüssigkeit kontrolliert werden. Das Verhältnis aus CO_2 -Konzentrationen ein- und austretender Flüssigkeit eines Betriebspunkts entspricht dem Verhältnis aus den, basierend auf Ergebnissen der Flüssigkeitsprobenanalyse ermittelten, Integralen S der zugehörigen Proben. Mithilfe dieses Zusammenhangs gemäß Gleichung 3-25 kann der flüssigkeitsseitige vol. Stoffübergangskoeffizient $k_L a_e$ nach Gleichung 3-23 berechnet werden.

$$\ln\left(\frac{x_{\text{CO}_2,0}}{x_{\text{CO}_2,u}}\right) = \ln\left(\frac{S_o}{S_u}\right) \quad (3-25)$$

Um die Bestimmungsunsicherheit der Methode zur Flüssigkeitsprobenanalyse (cf. Kapitel 3.4.2) abzuschätzen, wird eine Probe bekannter Konzentration mehrmals analysiert und in analoger Weise mittels Gleichung 3-24 ausgewertet. Aus Ergebnissen aufeinanderfolgender Analysen wird der maximal auftretende Variationskoeffizient ermittelt. In weiterer Folge wird die Auswirkung dieser Abweichung auf das Ergebnis flüssigkeitsseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ unter Berücksichtigung des logarithmischen Verhältnisses ermittelter Integrale ausgewertet.

3.5.3 Gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$

Der flüssigkeitsseitige Widerstand ist zufolge des verwendeten Messverfahrens zur Bestimmung von $k_G a_e$ vernachlässigbar. Somit ist der Zusammenhang für den gaseitigen Stoffdurchgangskoeffizienten entsprechend Gleichung 2-20a gültig. Daher wird Gleichung 2-29 für diesen Fall in Form von Gleichung 3-26 zur Auswertung des gaseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$ verwendet.

$$(k_{\text{SO}_2,G} \cdot a_e) \cong (k_{\text{OG}} \cdot a_e) = \frac{u_G}{Z} \cdot \ln\left(\frac{y_{\text{SO}_2,u}}{y_{\text{SO}_2,o}}\right) \quad (3-26)$$

Wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben, wird während Versuchen die SO_2 -Konzentration an zu untersuchenden stationären Betriebszuständen über und unter der Packung zumindest einminütig aufgezeichnet. In Gleichung 3-26 werden über stabile Aufzeichnungsintervalle gemittelte Konzentrationen (y) diesbezüglicher Messwerte eingesetzt.

3.5.4 Vergleich von Versuchsergebnissen

Um Vergleiche zwischen Packungen an definierten Betriebspunkten der untersuchten Arbeitsbereiche zu ermöglichen, werden die ermittelten Stofftransportparameter mathematisch beschrieben. In dieser Arbeit ermittelte Stofftransportparameter von Packungen weisen in Abhängigkeit der jeweiligen variablen Belastungsgröße (u_L , F) Verläufe auf, die nach Logarithmieren linearisieren. Daher werden diese Verläufe über Potenzfunktionen beschrieben. Hierfür wird im Anschluss einer Logarithmierung eine lineare Regression durchgeführt, um die Koeffizienten dieser Potenzfunktionen zu berechnen.

Um in dieser Arbeit ermittelte effektive Phasengrenzflächen a_e untersuchter Packungen auf ihre Plausibilität zu überprüfen, werden diese mit Vorhersagen empirischer Modelle aus Kapitel 2.3 verglichen. Als Näherung werden zur Berechnung dieser Modelle die dynamische Viskosität und Oberflächenspannung reinen Wassers verwendet. Die dynamische Viskosität μ_L wird hierfür dem VDI-Wärmeatlas [50] entnommen. Zur Berechnung der Oberflächenspannung σ in Abhängigkeit der Temperatur wird die Eötvössche Regel [51] verwendet. Für die kritische Oberflächenspannung σ_c wird nach Bravo et al (1982) [52] für Stahl ein Wert von $75 \cdot 10^{-3}$ N/m angenommen. Als Flüssigkeitsdichte ρ_L wird ebenfalls vereinfachend jene reinen Wassers verwendet, die mittels einer Korrelation von Nayar et al (2016) [53] berechnet wird.

Um die Übereinstimmung ermittelter volumetrischer Stoffübergangskoeffizienten ($k_L a_e$ und $k_G a_e$) in dieser Arbeit untersuchter Packungen mit Literaturdaten zu prüfen, werden in Schlager et al (2022) [25] zusammengefasste Korrelationen für Versuchsdaten mehrerer Autoren verwendet. Diese sind mit in dieser Arbeit angewandten Stoffsystemen kompatibel. Die Korrelationen beschreiben Versuchsdaten der Werke Laso et al. (1995) [54], Valenz et al. (2011) [55], Rejl et al. (2014) [56], Rejl et al. (2015) [57], Kunze et al. (2015) [58], Wang (2015) [27], und Flagiello et al. (2020) [59] zu ähnlichen Packungen dieser Arbeit.

4 Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt die Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Versuche zur Bestimmung der Stofftransportparameter a_e , $k_L a_e$ und $k_G a_e$ untersuchter Packungsgeometrien wieder.

Als zusätzliche Information wird für eine ausgewogene Packungscharakterisierung einleitend das Ergebnis einer qualitativen Bewertung von bereits im Vorfeld dieser Arbeit an den Versuchsständen ermittelten fluiddynamischen Parametern ($\Delta p/Z$ und h_L) der untersuchten Packungen präsentiert.

Effektive Phasengrenzflächen a_e wurden über Absorption atmosphärischen Kohlenstoffdioxids in verdünnter Natronlauge ermittelt. Die Bestimmung flüssigkeitsseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ erfolgte über die Methode der Desorption von CO_2 aus Wasser. Zur Bestimmung gasseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$ wurde SO_2 aus Luft in verdünnter Natronlauge absorbiert.

Die Versuchsergebnisse ermittelter Stofftransportparameter werden in diesem Kapitel außerdem Literaturdaten gegenübergestellt. Ermittelte Stofftransporteigenschaften weisen in den untersuchten Belastungsfeldern stets rechtsgekrümmte Verläufe auf, welche für Vergleichszwecke mittels Potenzfunktionen beschrieben werden. Diese sind in den Abbildungen dieses Kapitels als graue Linien angedeutet.

Weiters werden die untersuchten Packungsgeometrien je Versuchsstand (V-422 und V-150) auf Basis ermittelter Stofftransportparameter untereinander verglichen. Dazu wird die Standardpackungsgeometrie RMP N 250Y als Referenz gewählt.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden Abweichungen von Versuchsergebnissen ermittelter Stofftransportparameter (a_e , $k_L a_e$ und $k_G a_e$) gleicher Packungsgeometrien zwischen den Versuchsständen festgestellt.

Im Anhang dieser Arbeit sind Messdaten und Versuchsergebnisse betreffend Stofftransportparameter sowie fluiddynamischer Parameter untersuchter Packungen in tabellarischer Form enthalten. Sämtliche Versuchsdaten und Auswertungen stehen dem Lehrstuhl in digitaler Form zur Verfügung.

4.1 Fluiddynamische Parameter

Zu den untersuchten Packungsgeometrien stehen Messdaten der fluiddynamischen Parameter spezifischer Druckverlust $\Delta p/Z$ und dynamischer Hold-up h_L aus aktuellen Messungen des Lehrstuhls zur Verfügung (cf. Anhang B). Basierend auf ihrem fluiddynamischen Verhalten sind die Packungen voneinander abgrenzbar. Zu diesem Zweck wurden Kennfelder dieser Parameter erstellt. Nachstehend sind exemplarisch Kennfelder gemessener fluiddynamischer Parameter der Packung RMP N 250Y ($d = 150\text{mm}$) gezeigt.

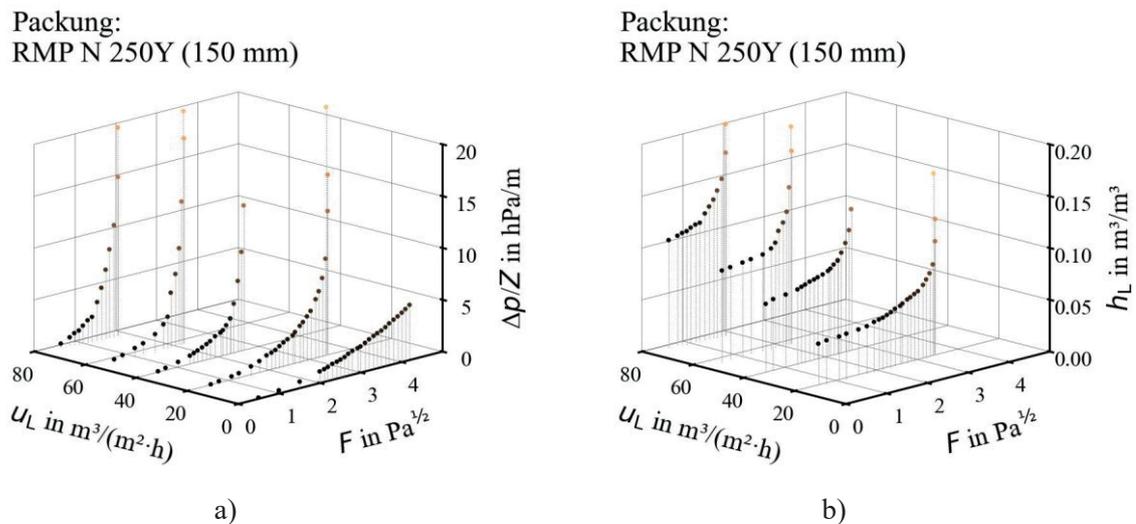


Abbildung 15: a) Spezifischer Druckverlust RMP N 250Y; b) Dynamischer Hold-up RMP N 250Y.

Das aus Kennfeldern abgeleitete fluiddynamische Verhalten der Packungen zueinander ist an beiden Versuchsständen ähnlich. Somit ergibt sich an den beiden Versuchsständen bezüglich der fluiddynamischen Parameter $\Delta p/Z$ und h_L dieselbe qualitative Reihung der vier Packungen nach Abbildung 16.

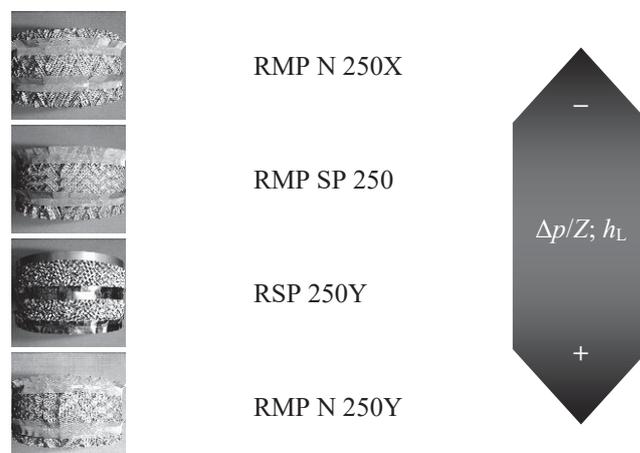


Abbildung 16: Reihung der Packungsgeometrien nach fluiddynamischem Verhalten.

Es sind jedoch Abweichungen des fluiddynamischen Verhaltens gleicher Packungsgeometrien an den Versuchsständen unterschiedlichen Kolonnendurchmessers festzustellen. Im Wesentlichen lassen sich diese auf ein bei geringerem F-Faktor einsetzendes Stauen am Versuchsstand V-150 reduzieren.

4.2 Effektive Phasengrenzflächen a_e

Ergebnisse zu an den Versuchsständen V-422 und V-150 bestimmten effektiven Phasengrenzflächen a_e werden in den nachfolgenden Darstellungen dieses Abschnitts bezogen auf die geometrische Packungsoberfläche angegeben. Die Gleichheit dieser Oberflächenkennwerte ist darin als gestrichelte Linie eingezeichnet. Ergebnisse dieser Arbeit zu a_e untersuchter Packungen werden in diesem Abschnitt außerdem mit Literaturmodellen verglichen.

Die Ergebnisse zu a_e am Versuchsstand V-422 bei einem F-Faktor von $1 \text{ Pa}^{1/2}$ sind gesammelt in Abbildung 17 dargestellt. Der erste Versuchsdurchgang zur Packung RMP SP 250 wird hier nicht berücksichtigt, da Anforderungen der Vorberieselung nicht erfüllt wurden. Am V-422 zweifach bestimmte a_e weichen zueinander vorwiegend um ca. 5 % ab. Bei geringen u_L treten teilweise höhere Unterschiede auf. Die ermittelten effektiven Phasengrenzflächen a_e nehmen mit steigender Berieselungsdichte u_L zu.

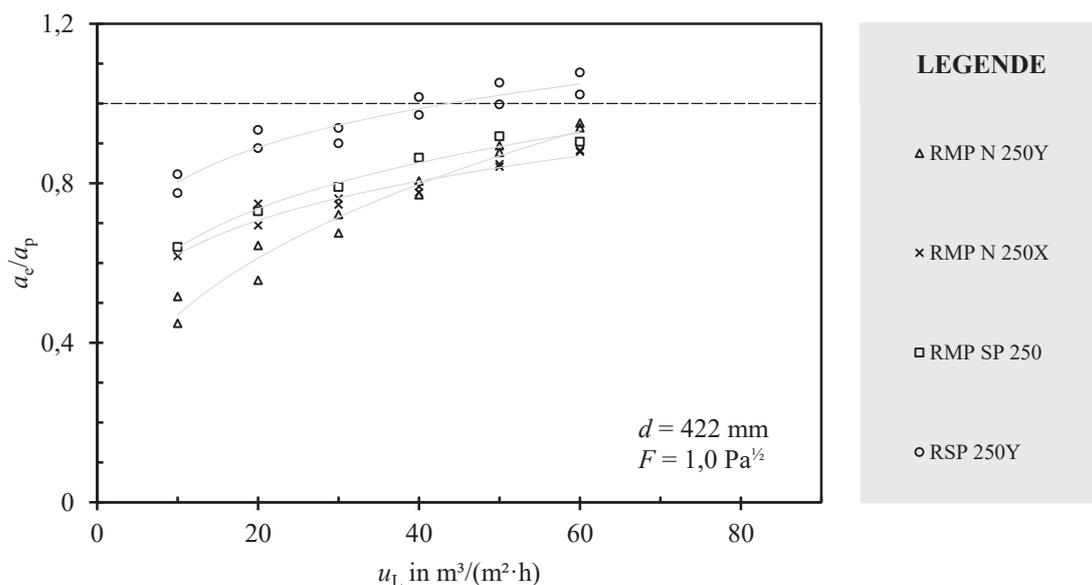


Abbildung 17: Ergebnisse zu am Versuchsstand V-422 ermittelten a_e ($F = 1 \text{ Pa}^{1/2}$).

Bei einem F-Faktor von $1 \text{ Pa}^{1/2}$ am Versuchsstand V-150 ermittelte a_e sind in Abbildung 18 gezeigt. Im Versuch mit der Packung RMP SP 250 ist bei u_L von $\sim 10 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ nachweislich Waschflüssigkeit in die Reingassonde eingetreten. Daher fehlt hierzu ein Datenpunkt in Abbildung 18. Im Vergleich zu den Ergebnissen am V-422 (cf. Abbildung 17) zeigen die Ergebnisse zu a_e am V-150 in Abbildung 18 ähnliche Verläufe, jedoch mit geringeren Werten.

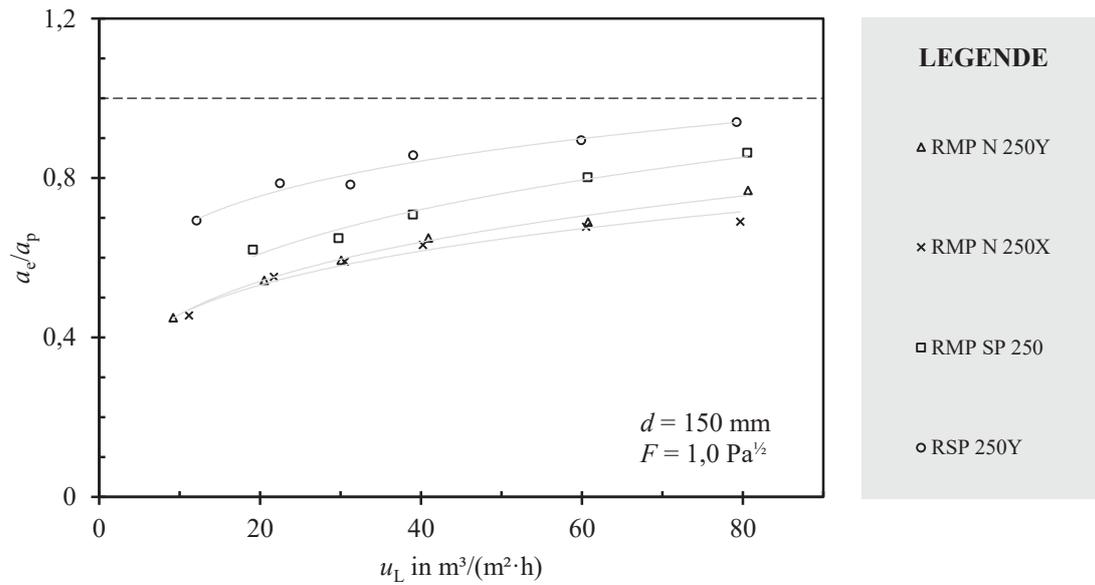


Abbildung 18: Ergebnisse zu am Versuchstand V-150 ermittelten a_e ($F = 1 \text{ Pa}^{1/2}$).

In Abbildung 19 gezeigte Ergebnisse zu a_e am Versuchstand V-150 bei einem F-Faktor von $0,5 \text{ Pa}^{1/2}$ sind zum Teil geringer als jene bei $1 \text{ Pa}^{1/2}$ (cf. Abbildung 18). Vor allem Ergebnisse zu a_e der Packung RSP 250Y weisen hier niedrigere Werte auf.

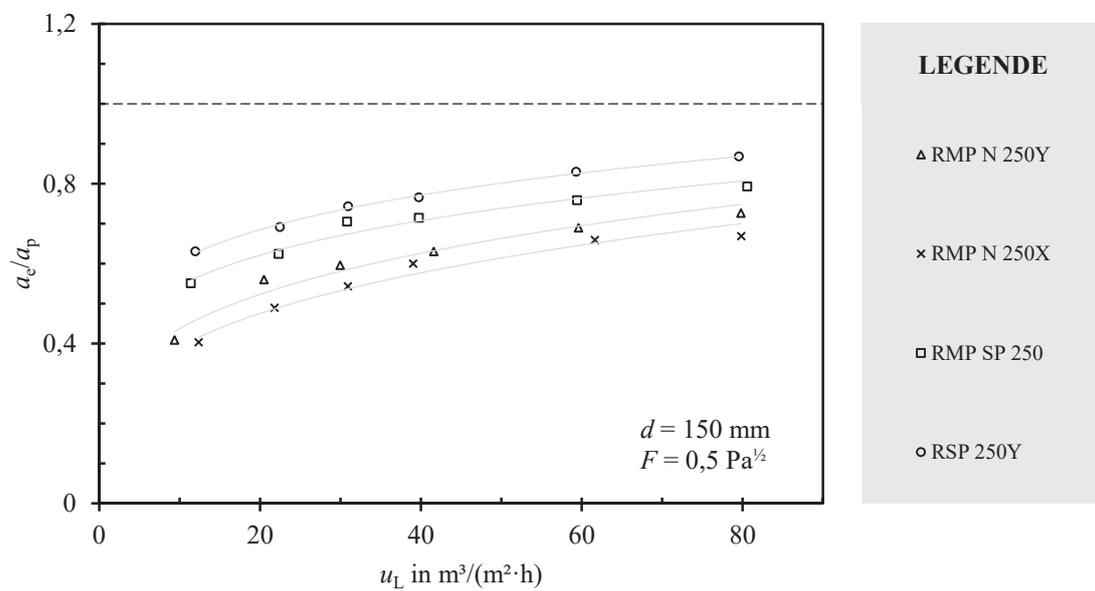


Abbildung 19: Ergebnisse zu am Versuchstand V-150 ermittelten a_e ($F = 0,5 \text{ Pa}^{1/2}$).

Aus Versuchsergebnissen am V-150 wurden effektive Phasengrenzflächen a_e' unter Berücksichtigung des gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten k_G auf Basis geeigneter experimenteller Ergebnisse dieser Arbeit zu $k_G a_e$ ermittelt. Bezogen auf die Ergebnisse unter Vernachlässigung von k_G ergeben sich bei $F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$ zu a_e' um ca. 3 % erhöhte Werte. Der Vergleich dieser auf verschiedene Weise berechneten effektiven Phasengrenzflächen ist in Abbildung 20 gezeigt.

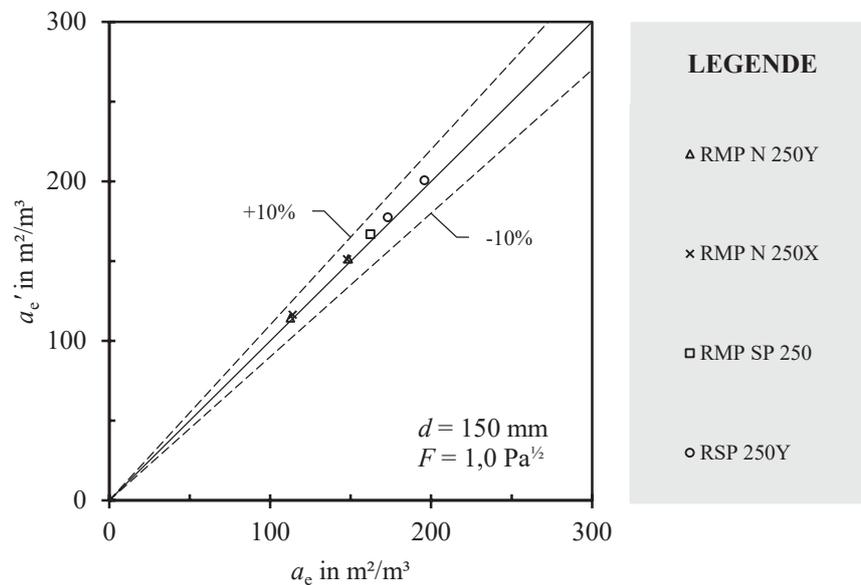


Abbildung 20: Vergleich von Ergebnissen der Methoden zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen bei einem F-Faktor $1,0 \text{ Pa}^{1/2}$.

Bei der Gasbelastung von $F = 0,5 \text{ Pa}^{1/2}$ tritt eine ähnliche Erhöhung um ca. 4 % von unter Berücksichtigung des gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten k_G berechneten effektiven Phasengrenzflächen a_e' auf. In Abbildung 21 ist hierzu der Vergleich von berechneten Ergebnissen zu effektiven Phasengrenzflächen mit und ohne Berücksichtigung von k_G dargestellt ($F = 0,5 \text{ Pa}^{1/2}$).

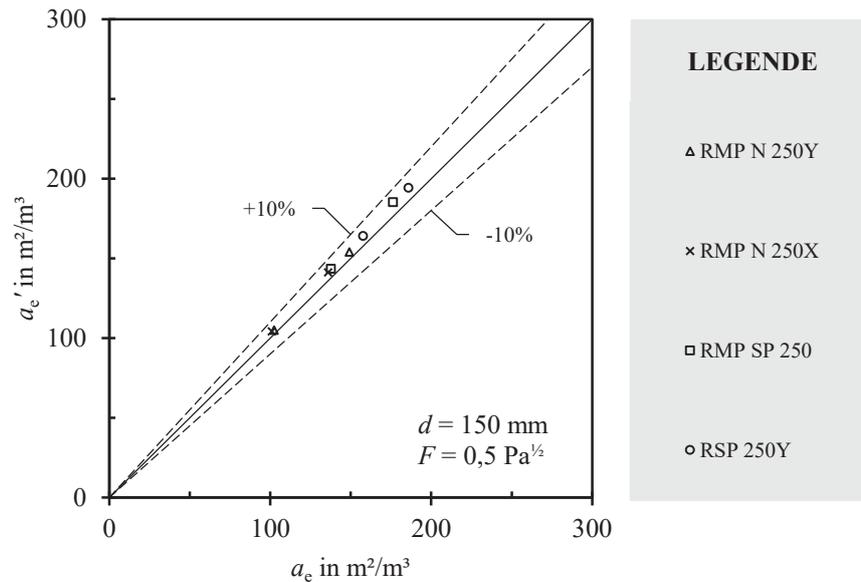


Abbildung 21: Vergleich von Ergebnissen der Methoden zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen bei einem F-Faktor $0,5 \text{ Pa}^{1/2}$.

Im Folgenden ist je untersuchter Packung ein Vergleich ermittelter effektiver Phasengrenzflächen a_e mit Literaturmodellen aus Kapitel 2.3 (Wang, Tsai, Song, Onda) als Diagramm dargestellt. Die a_e -Modelle für geordnete Packungen von Tsai (2010), Wang (2015) und Song (2017) basieren auf Versuchsdaten an einer Messkolonne mit einem Innendurchmesser von $0,43 \text{ m}$ (cf. Kapitel 2.3). Dies entspricht beinahe dem Messkolonnen-Durchmesser des Versuchsstands V-422 ($d = 422 \text{ mm}$). Mit Ausnahme des Modells von Song (2017) differenzieren die Modelle nicht zwischen einzelnen Packungen. Aus den nachfolgenden Diagrammen geht zusätzlich auch die Abweichung eigener Ergebnisse zwischen Versuchsständen hervor.

Versuchsergebnisse zu a_e der Packungsgeometrie RMP N 250Y sind in der Abbildung 22 Literaturmodellen gegenübergestellt. Darin kommen bei hohen Berieselungsdichten u_L die Ergebnisse am Versuchsstand V-422 den Modellen geordneter Packungen nahe. Ansonsten liegen die Versuchsergebnisse unterhalb dieser Modellvorhersagen. Die Packungsgeometrie RMP N 250Y wird nicht explizit in diesen Modellen berücksichtigt. Es ist jedoch eine ähnliche Packungsgeometrie des Herstellers Sulzer in der Datengrundlage der Modelle geordneter Packungen enthalten. Bei niedriger Berieselungsdichte weichen an den Versuchsständen V-422 und V-150 ermittelte a_e der Packungsgeometrie RMP N 250Y kaum voneinander ab (cf. Abbildung 22).

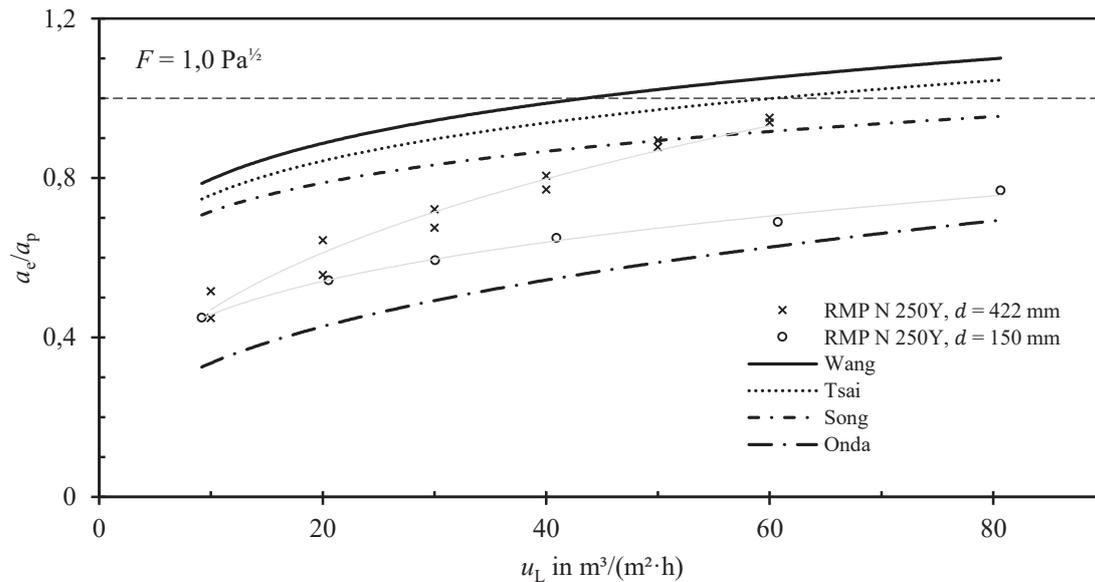


Abbildung 22: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RMP N 250Y in Relation zu Literaturangaben.

Ein ähnliches Bild zeigt sich zur Packungsgeometrie RMP N 250X. Wie aus Abbildung 23 hervorgeht, sind dabei am Versuchsstand V-150 bestimmte effektive Phasengrenzflächen a_e deutlich geringer als am V-422. Versuchsergebnisse am V-422 liegen dabei rund 20 % unterhalb der Modellvorhersagen zu geordneten Packungen. In diesen Modellen sind ähnliche Packungsgeometrien zur RMP N 250X anderer Hersteller berücksichtigt.

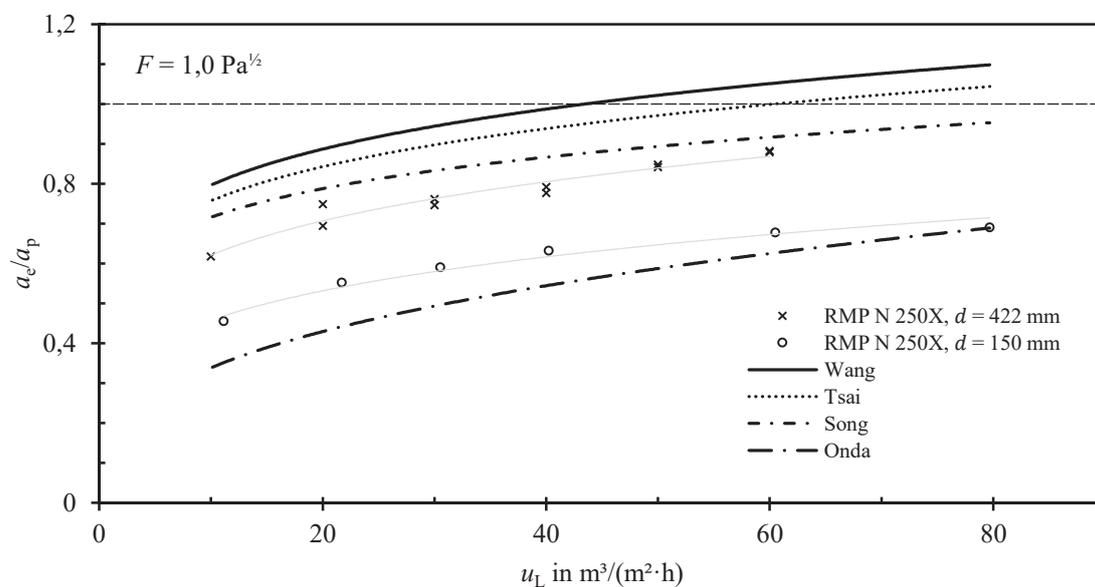


Abbildung 23: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RMP N 250X in Relation zu Literaturangaben.

Abbildung 24 betrifft die Packungsgeometrie RMP SP 250. In dieser Arbeit am Versuchsstand V-422 ermittelte a_e entsprechen darin teilweise Modellvorhersagen von Song (2017). Wie in Kapitel 2.3 erwähnt, werden bei diesem Modell sekundäre Phasengrenzflächen an der Kolonneninnenwand nicht zur effektiven Phasengrenzfläche gerechnet. Die Packungsgeometrie RMP SP 250 ist ebenfalls nicht in der Datengrundlage der Modelle geordneter Packungen inkludiert. Deshalb können die Modellvorhersagen zu geordneten Packungen hier grundsätzlich, wie bei den bisherigen Packungsgeometrien, nur als grobe Schätzungen angesehen werden.

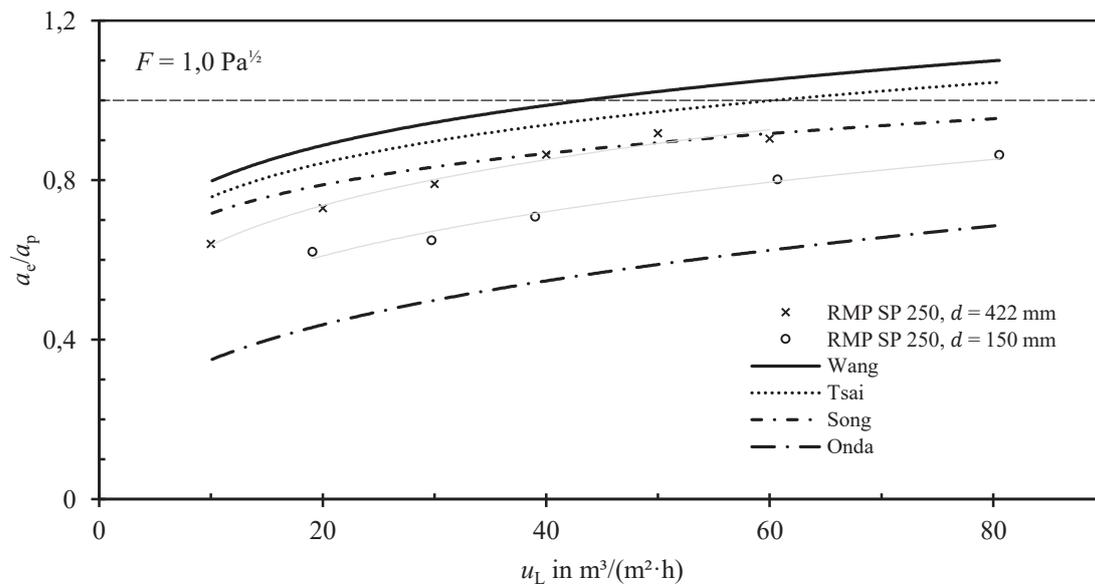


Abbildung 24: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RMP SP 250 in Relation zu Literaturangaben.

Die Versuchsergebnisse zur Packungsgeometrie RSP 250Y sind in Abbildung 25 Literaturmodellen gegenübergestellt. Hier stimmen die Ergebnisse am Versuchsstand V-422 mit Vorhersagen des Modells von Wang (2015) überein. Die Packung RSP 250Y ist in der Datengrundlage der Modelle von Wang (2015) und Song (2017) für einen Kolonnendurchmesser von 0,43 m enthalten. Im Modell von Song (2017) erfolgt eine willkürliche Reduzierung sekundärer Phasengrenzflächen (cf. Kapitel 2.3). Das für einen Vergleich der Versuchsergebnisse am V-422 zur Packungsgeometrie RSP 250Y geeignetste der angeführten Modelle in Abbildung 25 ist somit das Modell von Wang (2015).

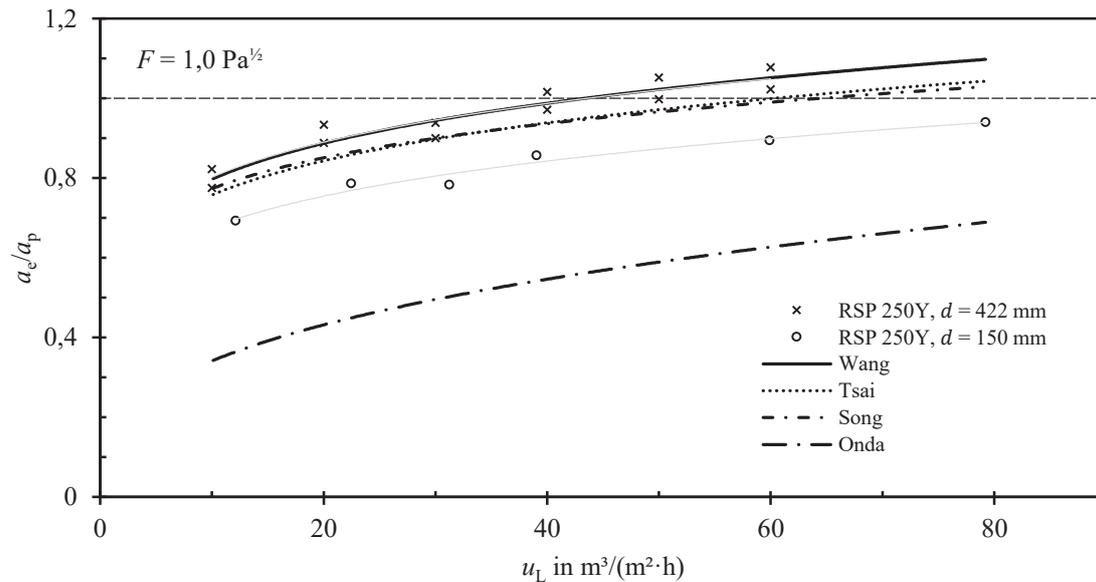


Abbildung 25: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RSP 250Y in Relation zu Literaturangaben.

4.3 Flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$

Nachfolgend sind die an den Versuchsständen bei einer Gasbelastung von $F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$ ermittelten Ergebnisse flüssigkeitsseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ untersuchter Packungen gezeigt. Ergebnisse zu $k_L a_e$ der Packungsgeometrien RMP N 250Y, RMP N 250X und RSP 250Y sind nachstehend Resultaten aus ähnlichen Versuchen vergleichbarer Packungsgeometrien der Fachliteratur gegenübergestellt. Dabei wird jeweils auf eingesetzte Kolonnendurchmesser und verwendete Betriebsparameter hingewiesen.

Die ermittelte Unsicherheit der Flüssigprobenanalyse zur Bestimmung des flüssigkeitsseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$ betrifft ausschließlich die Analysemethode selbst. Fehler bei der Probenahme werden darin nicht berücksichtigt. Aus 10 aufeinanderfolgenden Messungen ergibt sich als Abschätzung der Bestimmungsunsicherheit zur Methode aufeinanderfolgender Analysen ein Variationskoeffizient von maximal 3,7 %. Davon ausgehend resultiert für Auswertungen von $k_L a_e$ eine Unsicherheit von rund 3,2 %.

Die Ergebnisse zu $k_L a_e$ zweifach durchgeführter Versuche am Versuchsstand V-422 sind in Abbildung 26 gezeigt. Werte zu $k_L a_e$ der Packung RMP N 250X werden darin ab einer Berieselungsdichte u_L von 50 m h^{-1} nicht zutreffend durch die entsprechende Potenzfunktion beschrieben. Zwischen Ergebnissen zweifach bestimmter $k_L a_e$ liegen Abweichungen um 10 % und auch teilweise von über 20 % vor. Mit steigender Berieselungsdichte u_L sind gemäß Abbildung 26 am V-422 in der Regel höhere $k_L a_e$ der untersuchten Packungen aufgetreten.

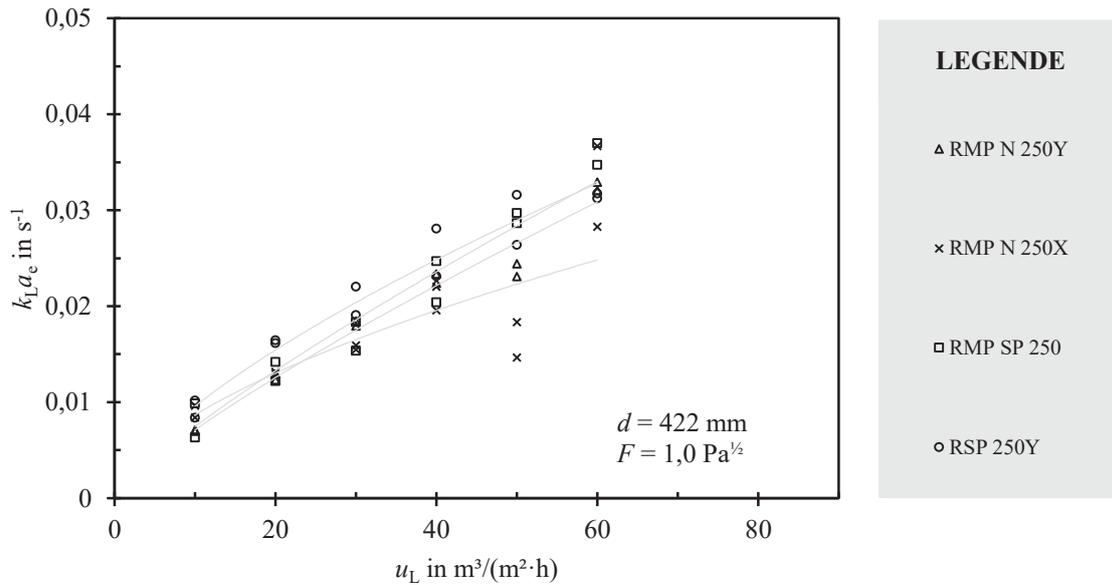


Abbildung 26: Ergebnisse zu am Versuchstand V-422 ermittelten k_{La_e} ($F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$).

Am kleineren Versuchsstand V-150 wurden Versuche zur Bestimmung von k_{La_e} bis zu einer Berieselungsdichte von 80 m h^{-1} durchgeführt (cf. Abbildung 27). Hier beträgt die Abweichung zwischen zweifach bestimmten k_{La_e} meist weniger als 10 %. Vereinzelt treten auch Abweichungen über 20 % auf. Die Potenzfunktion zur Packung RMP SP 250 in Abbildung 27 gibt die Versuchsergebnisse ab einer Berieselungsdichte von 60 m h^{-1} nicht zutreffend wieder. Die am V-150 ermittelten Verläufe zu k_{La_e} der Packungen sind jenen am V-422 ähnlich.

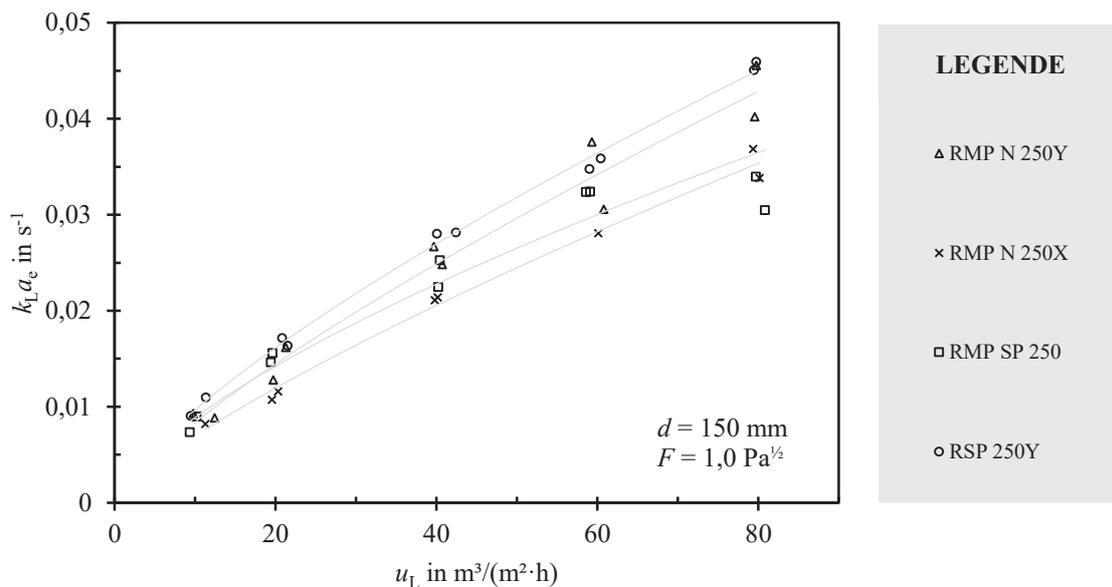


Abbildung 27: Ergebnisse zu am Versuchstand V-150 ermittelten k_{La_e} ($F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$).

In den nachfolgenden Abbildungen werden Ergebnisse zu $k_L a_e$ der Packungsgeometrien RMP N 250Y, RMP N 250X und RSP 250Y dieser Arbeit Korrelationen zu Versuchsdaten unterschiedlicher Autoren aus Schlager et al (2022) [25] gegenübergestellt (cf. Kapitel 3.5.4). Diesbezügliche Versuche wurden teilweise bei geringerer Gasbelastung als in dieser Arbeit (ca. 1 m/s) durchgeführt. Mit Ausnahme der Packung RSP 250Y betreffen die Korrelationen nicht die gleichen, sondern äquivalente Packungsgeometrien. Bei den Korrelationen handelt es sich um Potenzfunktionen (Pot.). In den Abbildungen sind diese Korrelationen nach dem entsprechenden Erstautor und dem Zusatz „(Pot.)“ benannt.

Die Ergebnisse zu $k_L a_e$ der Packung RMP N 250Y in Abbildung 28 liegen in etwa zwischen den Korrelationen zu Wang (Pot.) und Valenz (Pot.). Versuchsdaten der Korrelationen zu Kunze (Pot.) und Valenz (Pot.) basieren dabei auf Versuchen deutlich geringerer Gasbelastung (0,5 m/s bzw. 0,1 m/s). Die genannten Korrelationen betreffen Versuchsdaten zur geometrisch ähnlichen Packung MP 250.Y.

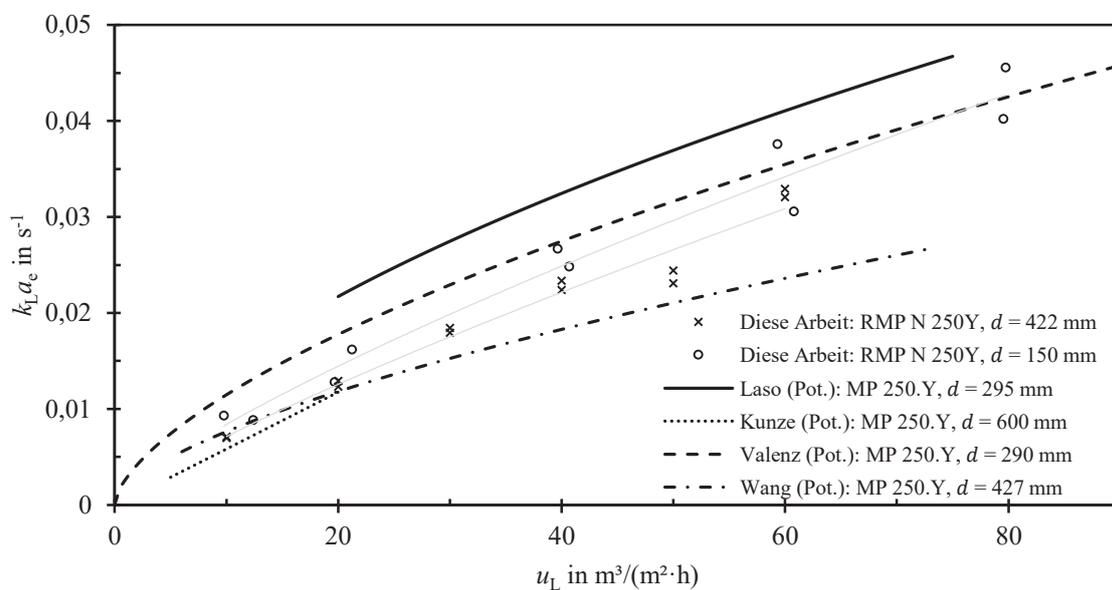


Abbildung 28: Ermittelte $k_L a_e$ der Packungsgeometrie RMP N 250Y in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25].

Abbildung 29 zeigt den Vergleich von Versuchsergebnissen zu $k_L a_e$ der Packung RMP N 250X mit einer geeigneten Korrelation aus Schlager et al [25]. Der Großteil der eigenen Ergebnisse weist hier vergleichsweise hohe Werte zur Korrelation Wang (Pot.) für die Packungsgeometrie MP 250.X auf. Indessen entspricht die Steigung der Korrelation Wang (Pot.) etwa jenen eigener Versuchsergebnisse.

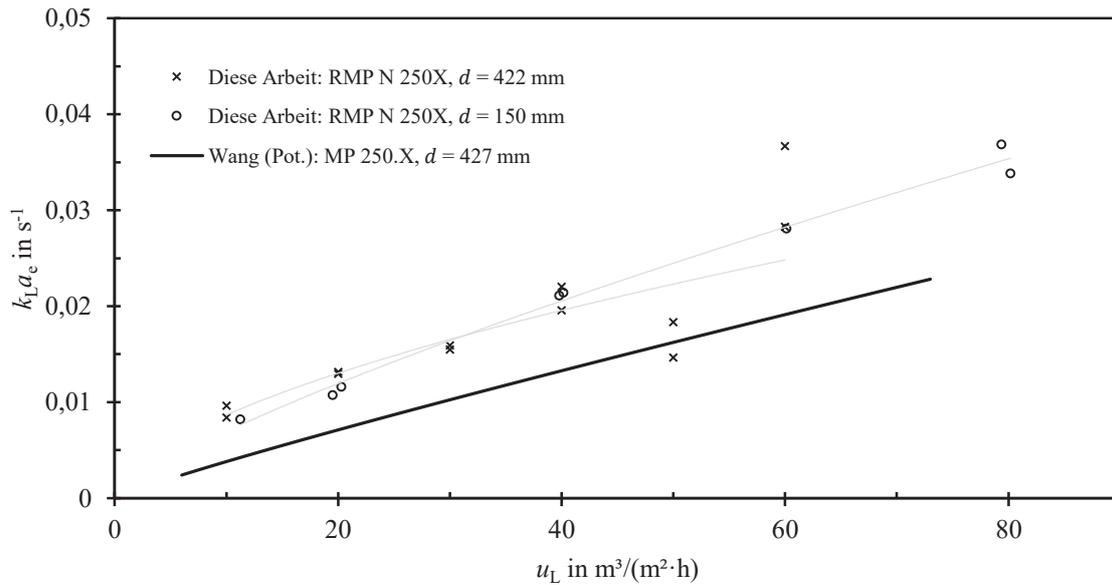


Abbildung 29: Ermittelte k_{La_e} der Packungsgeometrie RMP N 250X in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25].

Ermittelte k_{La_e} der Packungsgeometrie RSP 250Y sind in Abbildung 30 Korrelationen aus Schlager et al [25] gegenübergestellt. Daten zur Korrelation Rejl (Pot.) resultieren aus Versuchen bei relativ geringer Gasgeschwindigkeit von 0,1 m/s. Zu Rejl (Pot.) liegen teilweise Übereinstimmungen vor. Die Korrelation Wang (Pot.) weist hier vergleichsweise hohe Werte auf.

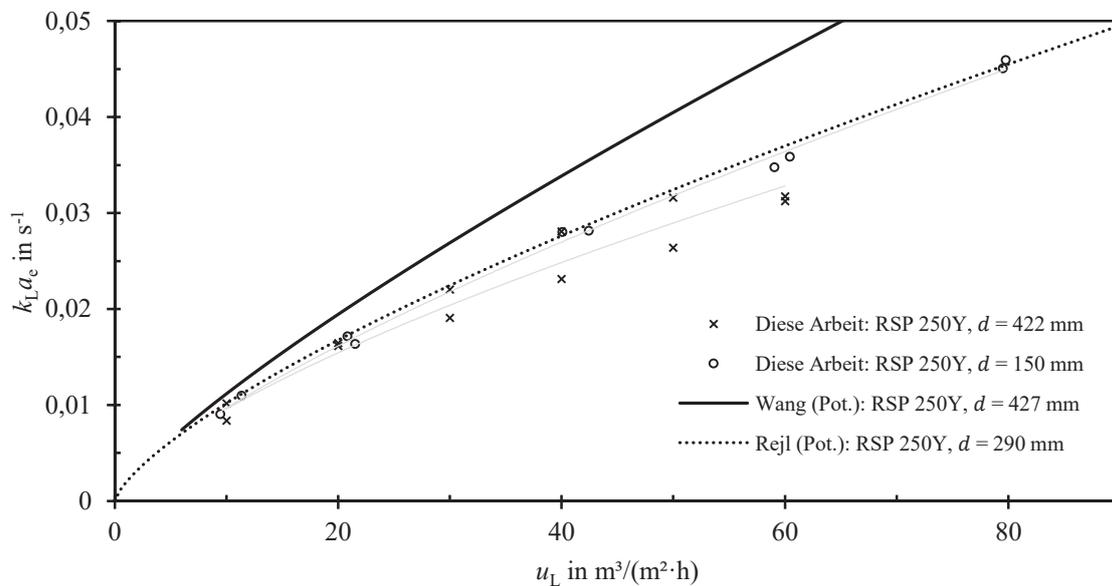


Abbildung 30: Ermittelte k_{La_e} der Packungsgeometrie RSP 250Y in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25].

4.4 Gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten k_{GA_e}

Nach den hier vorgestellten Ergebnissen von bei unterschiedlichen Berieselungsdichten und variabler Gasbelastung ermittelten gasseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{GA_e} werden die Ergebnisse zu k_{GA_e} der Packungsgeometrien RMP N 250Y, RMP N 250X und RSP 250Y Literaturdaten gegenübergestellt. Dazu werden für die Packungsgeometrie RSP 250Y frei verfügbare Vergleichsdaten verwendet. Ansonsten wird auf jene geometrisch äquivalenter Packungsgeometrien zurückgegriffen. Da diese Vergleichsdaten nicht genau den Betriebsbedingungen der vorliegenden Arbeit entsprechen, ist von einer gewissen Abweichung auszugehen.

Aus allen Ergebnissen zu k_{GA_e} der untersuchten Packungen geht gemäß nachfolgenden Abbildungen eine Zunahme mit der Gasbelastung hervor.

Ergebnisse der am Versuchsstand V-422 bei einer Berieselungsdichte von 10 m h^{-1} bestimmten k_{GA_e} untersuchter Packungen sind in Abbildung 31 gezeigt. Da während des Versuchs mit der Packung RSP 250Y bei F-Faktoren unter $2 \text{ Pa}^{1/2}$ ungeeignete SO_2 -Eintrittskonzentrationen vorlagen, sind diese Ergebnisse hier nicht dargestellt.

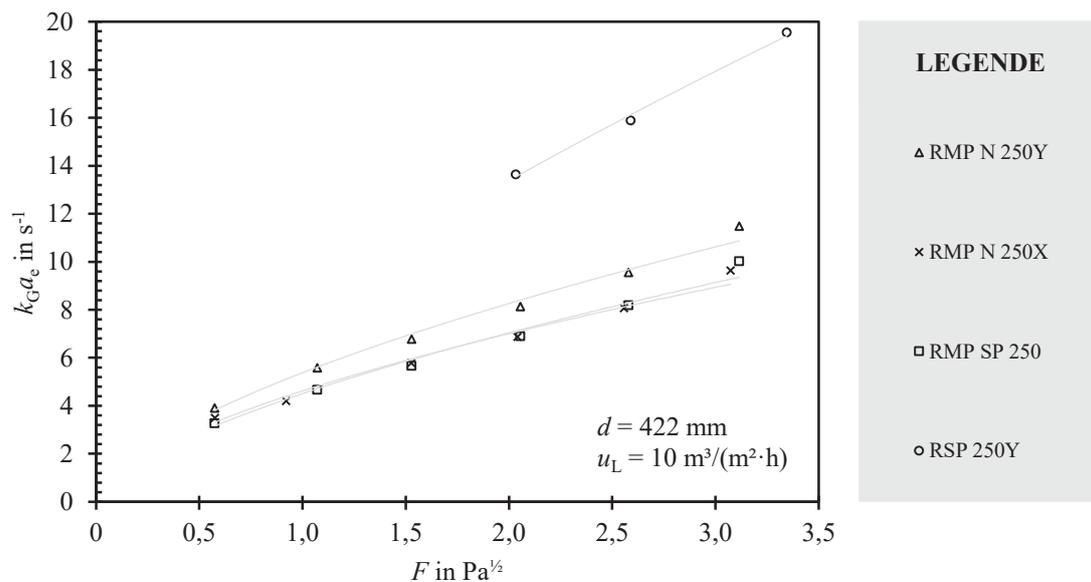


Abbildung 31: Ergebnisse am V-422 ermittelter k_{GA_e} (Berieselungsdichte $u_L = 10 \text{ m h}^{-1}$).

Bei der Berieselungsdichte u_L von 30 m h^{-1} wurden am Versuchsstand V-422 gemäß Abbildung 32 mit Ausnahme der Packung RSP 250Y um ca. ein Drittel höhere k_{GA_e} als bei $u_L = 10 \text{ m h}^{-1}$ bestimmt. Ein Messergebnis für k_{GA_e} bei einem F-Faktor von $2,8 \text{ Pa}^{1/2}$ der Packung RSP 250Y ist in nachstehender Abbildung nicht gezeigt, da an diesem Betriebszustand bereits von Fluten auszugehen ist (cf. Anhang B). Sowohl die Packungen RMP N 250X und RMP SP 250, als auch die Packungen RMP N 250Y und die Packung RSP 250Y weisen hier ähnliche Werte zu k_{GA_e} auf (cf. Abbildung 32).

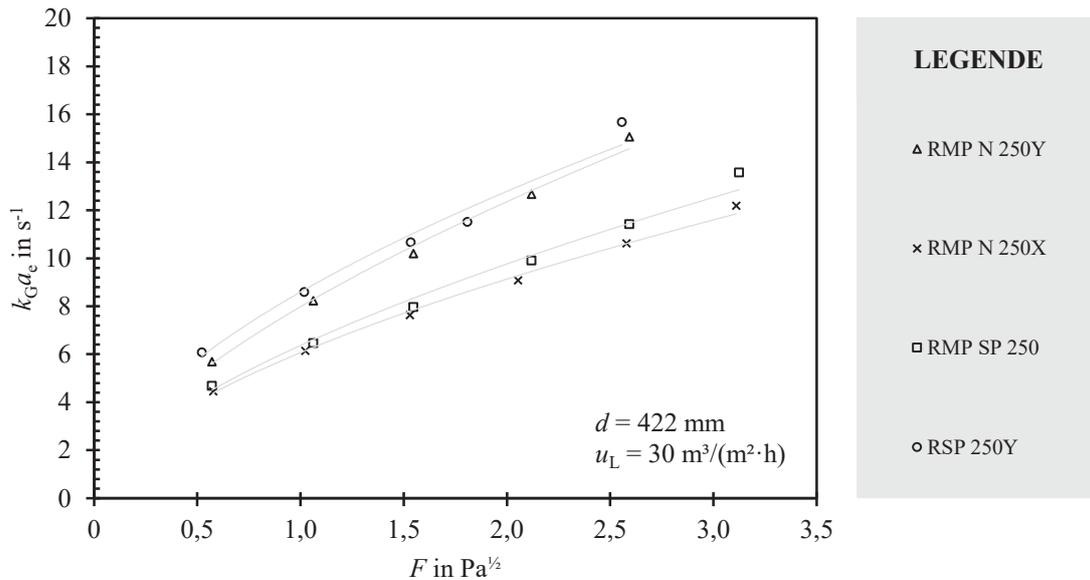


Abbildung 32: Ergebnisse am V-422 ermittelter $k_G a_e$ (Berieselungsdichte $u_L = 30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$).

Am Versuchstand V-150 bei einer Berieselungsdichte u_L von $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ermittelte $k_G a_e$ sind in Abbildung 33 gezeigt. Daraus gehen verglichen mit den Ergebnissen am V-422 bei gleicher Berieselungsdichte ähnliche Werte für die Packung RMP N 250X, etwas höhere Werte für die Packungen RMP N 250Y und RMP SP 250 sowie geringere Werte der Packung RSP 250Y hervor.

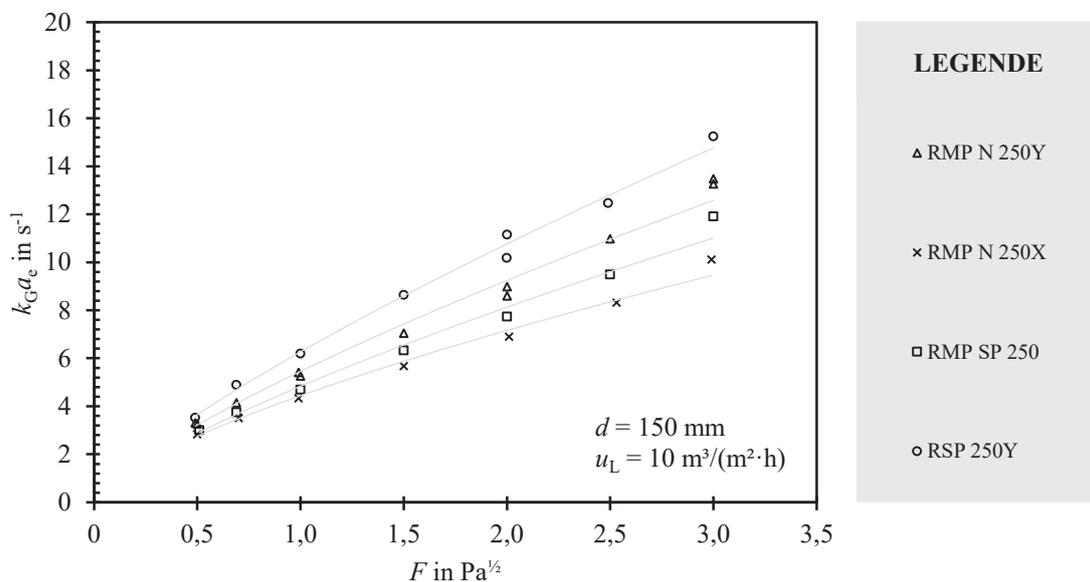


Abbildung 33: Ergebnisse am V-150 ermittelter $k_G a_e$ (Berieselungsdichte $u_L = 10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$).

In Abbildung 33 für eine Berieselungsdichte u_L von 10 m h^{-1} gezeigte Ergebnisse der Packungen sind mit einer Ausnahme um rund 20 % geringer als bei einer Berieselungsdichte u_L von 30 m h^{-1} (cf. Abbildung 34). Die Ausnahme stellt die Packung RMP SP 250 mit nur ca. 5 % geringeren k_{GA_e} bei einer Berieselungsdichte u_L von 10 m h^{-1} dar. Aufgrund eingetretenen Flutens werden Versuchsdaten zur Packung RMP N 250Y bei einem F-Faktor um $3 \text{ Pa}^{1/2}$ in Abbildung 34 nicht berücksichtigt. Bei einer Berieselungsdichte von 30 m h^{-1} ermittelte k_{GA_e} am V-150 (Abbildung 34) zeigen ein ähnliches Bild wie am V-422. Beispielsweise liegen die Verläufe der Packungen RMP N 250X und RMP SP 250 nahe beieinander. Jene der Packungen RMP N 250Y und RSP 250Y sind ebenfalls ähnlich.

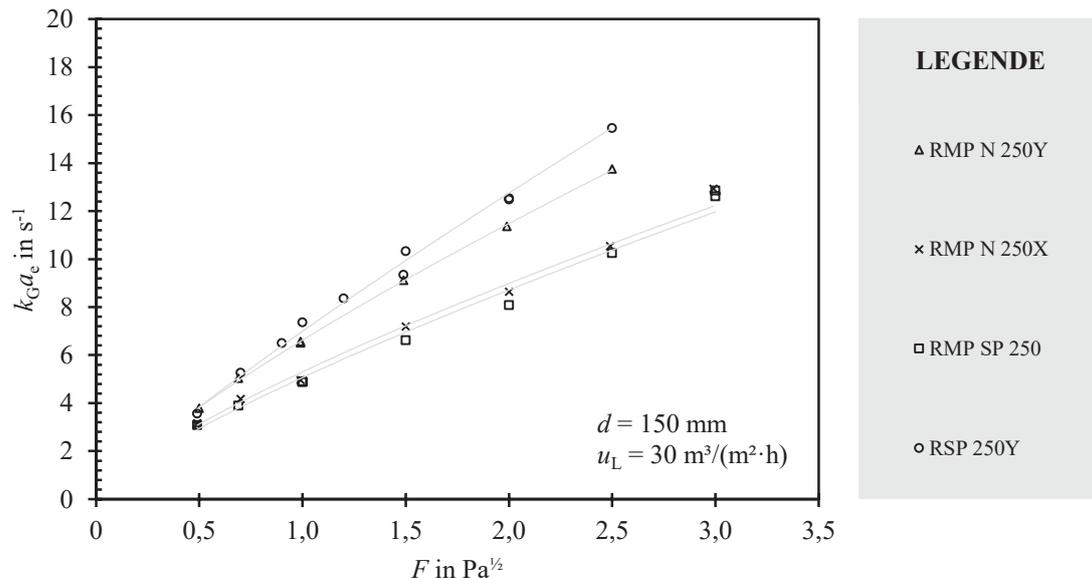


Abbildung 34: Ergebnisse am V-150 ermittelter k_{GA_e} (Berieselungsdichte $u_L = 30 \text{ m h}^{-1}$).

Ergebnisse zu k_{GA_e} der Packungsgeometrien RMP N 250Y, RMP N 250X und RSP 250Y dieser Arbeit werden in den nachstehenden Abbildungen Korrelationen zu Versuchsdaten verschiedener Autoren aus Schlager et al (2022) [25] gegenübergestellt (cf. Kapitel 3.5.4). Diese Korrelationen sind nachfolgend nach dem entsprechenden Erstautor und dem Zusatz „(Pot.)“ benannt.

Die Gegenüberstellung von ermittelten k_{GA_e} der Packungsgeometrie RMP N 250Y ($u_L = 30 \text{ m h}^{-1}$) mit Literaturdaten in Abbildung 35 zeigt eine weitgehende Übereinstimmung. Wegen des ähnlichen Durchmessers zum Versuchsstand V-422 und einer ähnlichen Berieselungsdichte u_L von $36,7 \text{ m h}^{-1}$ ist hier die Korrelation Wang (Pot.) der geometrisch ähnlichen Packungsgeometrie MP 250.Y am ehesten für einen Vergleich geeignet. Die Korrelationen Kunze (Pot.) und Rejl (Pot.) beruhen auf Versuchsdaten bei niedrigeren Berieselungsdichten ($7,5$, resp. 20 m/h) [25].

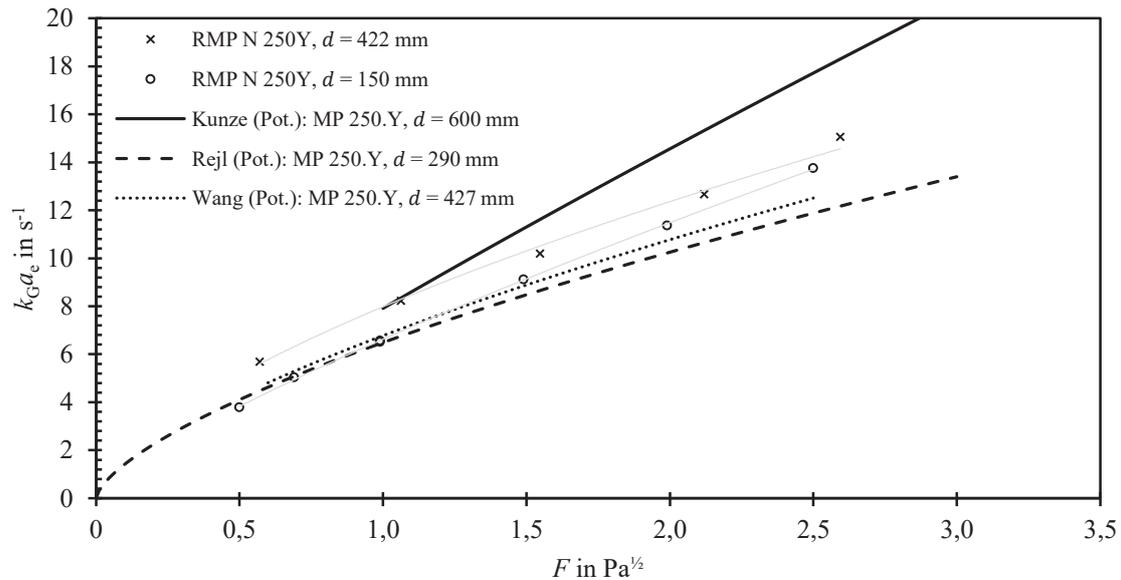


Abbildung 35: Ermittelte $k_G a_e$ der Packungsgeometrie RMP N 250Y ($u_L = 30 \text{ m/h}$) in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25].

Ergebnisse von $k_G a_e$ zur Packungsgeometrie RMP N 250X bei einer Berieselungsdichte u_L von 30 m h^{-1} entsprechen gemäß Abbildung 36 in etwa den Literaturdaten aus Schlager et al (2022) [25] der geometrisch vergleichbaren Packungsgeometrie MP 250.X. Darin gilt die Korrelation Wang (Pot.) für eine Berieselungsdichte u_L von $36,7 \text{ m h}^{-1}$ und die Korrelation Flagiello (Pot.) für eine Berieselungsdichte u_L von 16 m h^{-1} .

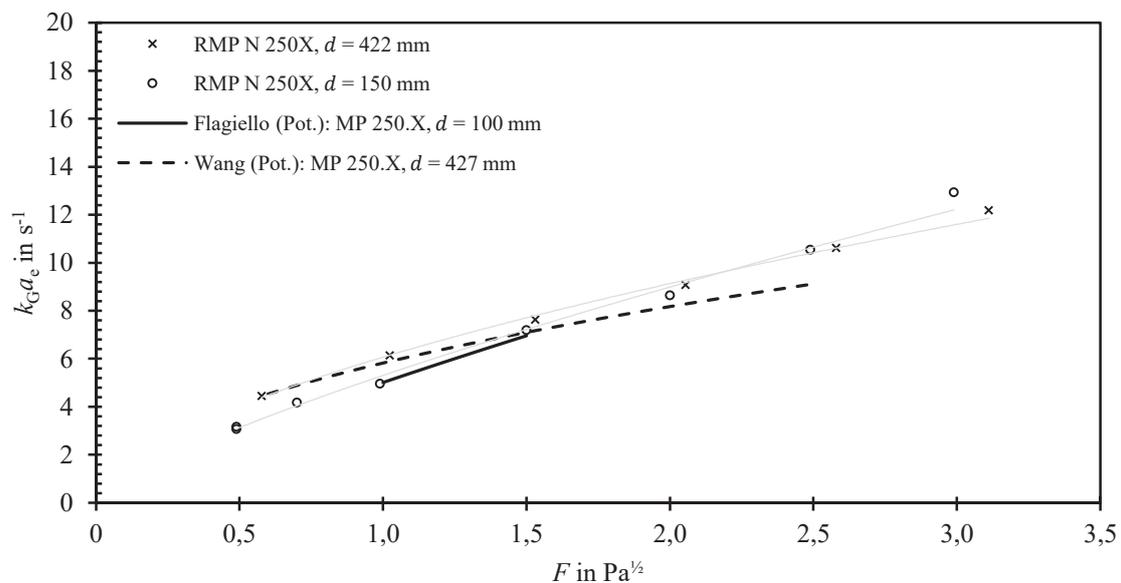


Abbildung 36: Ermittelte $k_G a_e$ der Packungsgeometrie RMP N 250X ($u_L = 30 \text{ m/h}$) in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25].

Bei einer Berieselungsdichte u_L von 30 m h^{-1} ermittelte k_{GA_e} der Packungsgeometrie RSP 250Y sind etwas geringer als Vergleichsdaten aus Schlager et al (2022) [25] (cf. Abbildung 37). Die Korrelation Rejl (Pot.) basiert auf Versuchsdaten bei einer Berieselungsdichte u_L von 20 m h^{-1} . Dagegen gilt die Korrelation Wang (Pot.) für eine höhere Berieselungsdichte u_L von $48,9 \text{ m h}^{-1}$.

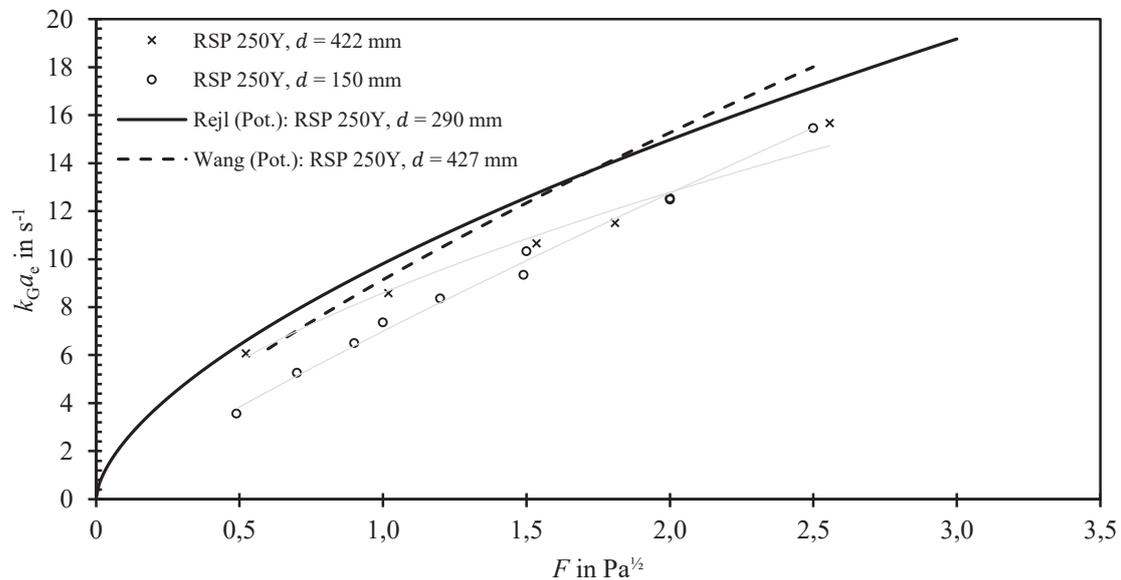


Abbildung 37: Ermittelte k_{GA_e} der Packungsgeometrie RSP 250Y ($u_L = 30 \text{ m/h}$) in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25].

In den gezeigten Abbildungen zu Literaturvergleichen (Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37) ist ein etwas steilerer Verlauf der am V-150 ermittelten k_{GA_e} relativ zu jenen am V-422 erkennbar. Bei hohen Gasbelastungen ermittelte k_{GA_e} sind an den Versuchsständen in etwa gleich.

4.5 Vergleich von Packungsgeometrien

Um die Unterschiede zwischen Packungen bezüglich der ermittelten Stofftransportparameter zu verdeutlichen, sind diese in den Tabellen dieses Abschnitts je Packung bezogen auf die Standardpackung RMP N 250Y dargestellt. Für diese vergleichende Darstellung wurden die Versuchsergebnisse mithilfe von Potenzfunktionen beschrieben (cf. Kapitel 3.5.4). Es werden dabei jeweils Betriebszustände im unteren, mittleren und oberen untersuchten Arbeitsbereich verglichen. In den Tabellen ist auch das in Kapitel 4.1 beschriebene relative fluiddynamische Verhalten der Packungen angedeutet.

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der am Versuchsstand V-422 ermittelten Stofftransportparameter untersuchter Packungen bezogen auf jene der Packung RMP N 250Y. Da die Potenzfunktion zur Beschreibung ermittelter $k_L a_e$ der Packung RMP N 250X bei einer Berieselungsdichte u_L von 60 m h⁻¹ nicht geeignet ist, werden in der nachstehenden Tabelle hierfür stattdessen tatsächliche Versuchsergebnisse verwendet.

Tabelle 9: Übersicht ermittelter relativer Stofftransportparameter der Packungen am Versuchsstand V-422.

| Parameter | F Pa ^{1/2} | u_L m ³ /(m ² ·h) | Packung, $d = 422$ mm (V-422) | | | |
|-----------|--------------------------|--|-------------------------------|----------|------------|------------|
| | | | RMP N 250Y | RSP 250Y | RMP SP 250 | RMP N 250X |
| a_e | 1 | 20 | Ref. | + 45% | + 20% | + 15% |
| | 1 | 40 | Ref. | + 24% | + 7% | + 1% |
| | 1 | 60 | Ref. | + 13% | - 0,5% | - 7% |
| $k_L a_e$ | 1 | 20 | Ref. | + 23% | + 6% | + 4% |
| | 1 | 40 | Ref. | + 12% | + 7% | - 12% |
| | 1 | 60 | Ref. | + 6% | + 7% | + 5% |
| $k_G a_e$ | 1 | 30 | Ref. | + 6% | - 20% | - 23% |
| | 2 | 30 | Ref. | - 1% | - 21% | - 27% |
| | 2,5 | 30 | Ref. | - 3% | - 21% | - 28% |

Am Versuchsstand V-150 zeigt sich betreffend der Stofftransportparameter von Packungen relativ zueinander ein ähnliches Bild. In analoger Weise zur vorherigen Übersicht ist in Tabelle 10 das Verhalten am V-150 abgebildet. Für $k_L a_e$ der Packung RMP SP 250 sind hierzu bei der Berieselungsdichte u_L von ca. 60 m h^{-1} ermittelte Werte herangezogen worden, da die beschreibende Potenzfunktion an dieser Stelle ungeeignet ist.

Tabelle 10: Übersicht ermittelter relativer Stofftransportparameter der Packungen am Versuchsstand V-150.

| Parameter | F $\text{Pa}^{1/2}$ | u_L $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | Packung, $d = 150 \text{ mm}$ (V-150) | | | |
|-----------|--------------------------|---|---------------------------------------|----------|------------|------------|
| | | | RMP N 250Y | RSP 250Y | RMP SP 250 | RMP N 250X |
| a_e | 1 | 20 | Ref. | + 40% | + 13% | - 2% |
| | 1 | 40 | Ref. | + 32% | + 13% | - 3% |
| | 1 | 60 | Ref. | + 28% | + 13% | - 4% |
| $k_L a_e$ | 1 | 20 | Ref. | + 12% | - 2% | - 17% |
| | 1 | 40 | Ref. | + 8% | - 8% | - 17% |
| | 1 | 60 | Ref. | + 6% | - 5% | - 17% |
| $k_G a_e$ | 1 | 30 | Ref. | + 6% | - 24% | - 20% |
| | 2 | 30 | Ref. | + 13% | - 24% | - 22% |
| | 2,5 | 30 | Ref. | + 15% | - 24% | - 22% |

Betreffend der Packungsgeometrie RSP 250Y zeigen die Tabellen dieses Abschnitts unabhängig vom Versuchstand verglichen mit anderen Packungsgeometrien höhere oder zumindest ungefähr gleiche Stofftransportparameter. Dabei weist die RSP 250Y einen etwas geringeren Druckverlust als die Packungsgeometrie RMP N 250Y auf. Die Packungsgeometrie RMP N 250X bewirkt von den untersuchten den geringsten Druckverlust, gleichzeitig treten bei dieser aber auch eher geringere Stofftransportparameter auf.

4.6 Vergleich zwischen Versuchsständen

Ergebnisse der Stofftransportparameter an den Versuchsständen unterschiedlichen Messkolonnen-Durchmessers sind in Tabelle 11 je Packungsgeometrie für Betriebszustände im unteren, mittleren sowie oberen Arbeitsbereich relativ zueinander angegeben. Bei dazu verwendeten relativen Abweichungen werden Ergebnisse am Versuchsstand V-150 auf jene am V-422 bezogen. Da in nachstehender Tabelle nicht die Streuung der ermittelten Parameter berücksichtigt ist, sollten für detailliertere Vergleiche die Abbildungen aus den bisherigen Abschnitten dieses Kapitels verwendet werden.

Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse an den Versuchsständen relativ zueinander (V-150 zu V-422).

| Parameter | F Pa ^{1/2} | u_L m ³ /(m ² ·h) | Packung, Abweichung V-150 zu V-422 | | | |
|-----------|--------------------------|--|------------------------------------|----------|------------|------------|
| | | | RMP N 250Y | RSP 250Y | RMP SP 250 | RMP N 250X |
| a_e | 1 | 20 | -12% | -15% | -17% | -25% |
| | 1 | 40 | -20% | -15% | -15% | -23% |
| | 1 | 60 | -24% | -14% | -14% | -23% |
| $k_L a_e$ | 1 | 20 | +15% | +5% | +7% | -8% |
| | 1 | 40 | +12% | +9% | -3% | +5% |
| | 1 | 60 | +11% | +11% | -2% | -13% |
| $k_G a_e$ | 1 | 30 | -19% | -19% | -22% | -16% |
| | 2 | 30 | -10% | +3% | -13% | -3% |
| | 2,5 | 30 | -7% | +11% | -10% | +1% |

Aus der vergleichenden Übersicht in Tabelle 11 werden systematisch geringere Werte für a_e am Versuchsstand V-150 deutlich. Bezüglich $k_L a_e$ treten am V-150 einerseits erhöhte Werte bei der Packungsgeometrie RMP N 250Y und andererseits teilweise geringere bei der Packungsgeometrie RMP N 250X auf. Bei geringer Gasbelastung sind $k_G a_e$ am V-422 relativ zum V-150 erhöht. Mit Erhöhung der Gasbelastung nehmen die Abweichungen zwischen $k_G a_e$ der Versuchsstände ab.

5 Diskussion der Ergebnisse

Nachfolgend sind die Versuchsergebnisse dieser Arbeit zu den untersuchten Stofftransporteigenschaften erörtert. Neben den hier behandelten Packungseigenschaften betreffend des Stofftransports existieren auch andere wesentliche Kriterien zur Auswahl geordneter Packungen, wie zum Beispiel das fluiddynamische Verhalten oder die Anschaffungskosten. Oftmals müssen verschiedene Kriterien miteinander abgewogen werden. Dies wird beispielsweise in den tabellarischen Vergleichen der untersuchten Packungsgeometrien in Kapitel 4.5 deutlich. Die Packungsgeometrien mit höheren Stofftransportparametern bewirken darin tendenziell höhere Druckverluste und damit erhöhte Betriebskosten.

5.1 Effektive Phasengrenzflächen a_e

Am Versuchsstand V-422 sind die Ergebnisse zu effektiven Phasengrenzflächen a_e mit geringer Abweichung erfolgreich reproduziert worden. Auch am Versuchsstand V-150 ist die Reproduzierbarkeit über wiederholtes Einstellen von Betriebszuständen und Vergleich der Abscheidegrade während Versuchen überprüft, jedoch nicht dokumentiert worden.

Alle ermittelten effektiven Phasengrenzflächen a_e untersuchter Packungen zeigen eine positive Korrelation zur Berieselungsdichte. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, da mit steigender Berieselungsdichte weniger unbenetzte Packungsoberflächen beobachtet wurden.

Die Ursache des steilen Verlaufs der Ergebnisse von a_e der Packung RMP N 250Y am Versuchsstand V-422 ist nicht geklärt (cf. Abbildung 22). Möglicherweise kann dieses Verhalten auf eine durch die Flüssigkeitsaufgabe bei geringen Berieselungsdichten verursachte Fehlverteilung der Flüssigkeit (Maldistribution) oder auf die Randgängigkeit dieser Packung zurückgeführt werden.

Aus Messungen am Versuchsstand V-150 bei niedriger Gasbelastung resultieren verglichen mit jenen mittlerer Gasbelastung teilweise verringerte a_e . Bei geringer Gasbelastung bilden sich eher glatte Flüssigkeitsfilme aus, welche bei höheren Gasbelastungen aufgewellt und verwirbelt werden. Möglicherweise liegt darin die Begründung zum beobachteten Verhalten. Alternativ könnten auch Kurzschlussströmung aufgrund mangelhafter Gasverteilung bei geringer Gasbelastung zu den relativ niedrigen a_e geführt haben.

Die Methode zur Berechnung effektiver Phasengrenzflächen aus Versuchsdaten mit Berücksichtigung gaseitiger Stoffübergangskoeffizienten k_G hat im Vergleich zu einer Vernachlässigung dieser k_G geringfügig größere effektive Phasengrenzflächen zur Folge. Mit der Berücksichtigung von k_G ist jedoch eine erhöhte Unsicherheit aus der Bestimmung hierfür notwendiger k_{Ga_e} verbunden. Eine Vernachlässigung von k_G zur Berechnung effektiver Phasengrenzflächen ist daher vertretbar.

Vergleiche ermittelter a_e mit Literaturmodellen belegen deren Plausibilität. In dieser Arbeit sind Ergebnisse zu a_e untersuchter geordneter Packungen durchwegs größer als Vorhersagen des Modells von Onda et al (1968) für benetzte Oberflächen von Füllkörperschüttungen. Auch von Tsai (2010) [26] wird dieses Verhalten von a_e geordneter Packungen dokumentiert. Ergebnisse zu a_e der Packung RSP 250Y stimmen bei ähnlichem Kolonnendurchmesser ($d = 422$ mm) mit dem Modell von Wang (2015) überein, worin diese Packung explizit berücksichtigt ist. Ergebnisse zu anderen Packungen sind tendenziell geringer als Vorhersagen der Modelle geordneter Packungen. Dabei ist zu betonen, dass diese im Gegensatz zur RSP 250Y nicht in der Datengrundlage dieser Modelle vorhanden sind.

Die Packungen verhalten sich an den Versuchsständen in Relation zueinander ähnlich (cf. Tabelle 9, Tabelle 10). Tendenziell ist mit großen a_e auch ein hoher spezifischer Druckverlust verbunden. Der unterschiedliche Profilierungswinkel der Packungsgeometrien RMP N 250X und RMP N 250Y scheint keinen Einfluss auf a_e zu haben. Die Packungsgeometrie RSP 250Y weist von den untersuchten die größten a_e bei einem etwas geringeren spezifischen Druckverlust als der RMP N 250Y auf. Weiters deutet die Auswertung der Ergebnisse darauf hin, dass der gerade Übergang zwischen Packungslagen an der RMP SP 250 im Vergleich zu Standardpackungen leicht erhöhte Werte von a_e bewirkt.

Am Versuchsstand V-150 ermittelte effektive Phasengrenzflächen a_e sind um bis zu 25 % kleiner als jene am V-422 (cf. Tabelle 11). Nachfolgend sind mögliche Ursachen für dieses Verhalten angeführt.

Der Randbereich nimmt bezogen auf den Messkolonnenquerschnitt am Versuchsstand V-150 einen größeren Anteil als am V-422 ein. In diesem Bereich liegt vermutlich durch die Bildung von ausgeprägten Rinnsalen an der Kolonnen-Innenwand eine geringere spezifische Phasengrenzfläche als an den Flüssigkeitsfilmen im Packungsinneren vor. Hinzukommend enden am Versuchsstand V-150 anteilmäßig mehr Kanäle an der Kolonnen-Innenwand als am V-422. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass sich bei geringen Berieselungsdichten die Ergebnisse von a_e zur RMP N 250Y am V-422 jenen am V-150 annähern (cf. Abbildung 22). Bei dieser Packungsgeometrie enden aufgrund des Profilierungswinkels verglichen mit den anderen die meisten Kanäle im Randbereich (Randgängigkeit).

Eine weitere mögliche Ursache ist eine an den Versuchsständen verschieden ausgeprägte Fehlverteilung der Flüssigkeit (Maldistribution). Eine solche könnte beispielsweise aus an den Versuchsständen unterschiedlichen Packungshöhen oder Flüssigkeitsverteilern resultieren.

Die Reingassonde am Versuchsstand V-422 ist nicht wie am V-150 direkt über der Packung, sondern oberhalb des Flüssigkeitsverteilers positioniert. Theoretisch werden damit bei Messungen wirksame Phasengrenzflächen über eingebauten Packungen miterfasst. Bei Versuchen wurde jedoch diesbezüglich keine Benetzung oberhalb der Packung beobachtet.

Während Versuchen gemessene CO_2 -Konzentrationen lagen stets im mittleren Messbereich des Gasanalysators und sind daher mit eher geringen Messfehlern behaftet. An stationären Betriebszuständen sind stets gleichmäßige Konzentrationsverläufe innerhalb einer geringen Schwankungsbreite aufgetreten. Angezeigte Messwerte des Gasanalysators wurden zur Bestätigung dieser mithilfe anderer CO_2 -Messgeräte regelmäßig überprüft.

5.2 Flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e}

Ergebnisse der Versuche zu k_{La_e} wurden an den beiden Versuchsständen mit einer mittleren Abweichung von ungefähr 10 % reproduziert.

Die ermittelten flüssigkeitsseitigen volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} der Packungen korrelieren positiv mit der Berieselungsdichte. Dieses Verhalten von k_{La_e} wird beispielsweise auch von Rejl et al [11] dokumentiert.

In dieser Arbeit ermittelte flüssigkeitsseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} weichen zum Teil von Versuchsdaten aus der Fachliteratur ab. Diese Literaturdaten weisen jedoch auch untereinander ähnliche Abweichungen auf. Außer für die Packungsgeometrie RSP 250Y sind bei Vergleichen ermittelter k_{La_e} Literaturdaten zu ähnlichen Packungsgeometrien anderer Hersteller verwendet worden. Der Vergleich mit Literaturdaten zur RSP 250Y zeigte eine gute Übereinstimmung mit Versuchsdaten von Rejl et al. (2015) [57]. Ergebnisse der Packungsgeometrie RMP N 250Y zu k_{La_e} liegen zwischen Vergleichsdaten der Literatur (cf. Abbildung 28). Ermittelte k_{La_e} der Packungsgeometrie RMP N 250X sind an den beiden Versuchsständen ungefähr gleich und höher als jene von Wang (2015) [27] für die geometrisch äquivalente Packung MP 250.X (cf. Abbildung 29).

Die untersuchten Packungsgeometrien verhalten sich bezüglich k_{La_e} an beiden Versuchsständen ähnlich. Bei geringen Berieselungsdichten erreicht dabei die Packungsgeometrie RSP 250Y relativ hohe Werte flüssigkeitsseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} . Ein geringerer Profilierungswinkel scheint zumindest am Versuchsstand V-150 höhere k_{La_e} zu begünstigen. Hierzu ist möglicherweise der in den nächsten Absätzen diskutierte Aspekt der Probenahme unterhalb der Packung in Verbindung mit einer ausgeprägten Randgängigkeit relevant.

Bei Versuchen zur Bestimmung von k_{La_e} waren an den Versuchsständen abgesehen vom Durchmesser der Messkolonnen unterschiedliche Voraussetzungen gegeben:

Am Versuchsstand V-150 wurden in etwa die doppelten Packungshöhen verglichen zum V-422 eingebaut. Die Flüssigkeitsaufgabe an den Versuchsständen ist zwar ähnlich aber nicht ident ausgeführt. Wie schon an anderer Stelle erwähnt, weichen die Tropfstellendichten und –Anzahlen voneinander ab. Aus diesen Gründen lag bei den durchgeführten Versuchen eine wahrscheinlich unterschiedlich ausgeprägte Flüssigkeits-Fehlverteilung (Maldistribution) vor, deren Einfluss auf die Ergebnisse zu k_{La_e} nicht bekannt ist. Bei Probenahmen am Versuchsstand V-150 wurde unterhalb der Packung kaum Flüssigkeit aus dem Randbereich des Kolonnenquerschnitts entnommen. Geht man davon aus, dass Flüssigkeit im Randbereich weniger am Stofftransport beteiligt ist, sind folglich für k_{La_e} am V-150 verglichen zum V-422 höhere Werte zu erwarten.

Tatsächlich sind bei der Packungsgeometrie RMP N 250Y am V-150 höhere Werte für k_{La_e} aufgetreten, die in einer nicht repräsentativen Flüssigkeitsprobenahme begründet sein könnten (cf. Tabelle 11, Abbildung 28). Gerade bei der Packung RMP N 250Y am V-150 liegt aufgrund ihres Profilierungswinkels (45°) und dem geringen Kolonnendurchmesser (150 mm) vermutlich eine relativ hohe Randgängigkeit vor, wodurch dieser Effekt möglicherweise begünstigt wird.

Unter Berücksichtigung der Streuung von den Versuchsergebnissen zu k_{La_e} stimmen die sonstigen Ergebnisse an den Versuchsständen weitgehend überein.

Aus den Ergebnissen an den beiden Versuchsständen kann kein eindeutiger Einfluss des Kolonnendurchmessers festgestellt werden. Möglicherweise ergibt sich aus Versuchen bei Verwendung gleicher Packungshöhen, gleicher Flüssigkeitsverteiler sowie gleicher Probenahmeverrichtungen ein nachweisbarer Einfluss des Kolonnendurchmessers.

Wiederholt bei einer Berieselungsdichte von 50 m h^{-1} aufgetretene niedrige Werte zu k_{La_e} der Packung RMP N 250X am V-422 sind möglicherweise auf ungünstige Strömungsbedingungen in der Kolonne bei der Probenahme zurückzuführen. Aufgrund von Kurzschlussströmungen könnte ein überproportionaler Anteil an Flüssigkeit mit relativ hohem CO_2 -Gehalt aus dem Randbereich des Kolonnenquerschnitts beprobt worden sein.

Der größte Fehlereinfluss bei Versuchen zur Bestimmung von k_{La_e} ist vermutlich der Probenahme von Flüssigkeit unterhalb der Packung zuzuschreiben. Eine repräsentative Probenahme von Flüssigkeit ist dabei grundsätzlich schwierig. Beispielsweise müssten radiale Konzentrationsgradienten in der Kolonne berücksichtigt und Stofftransportvorgänge ab dem Eintreten der Flüssigkeit in die Auffangvorrichtung bis zum Abfüllen in Probeflaschen unterbunden werden. Die angegebene Bestimmungsunsicherheit der an die Probenvorbereitung anschließenden Analyseverfahren ist wahrscheinlich zum Großteil auf den sich während Analysen allmählich ändernden Trägergasvolumenstrom zurückzuführen.

5.3 Gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten k_{Ga_e}

Ergebnisse an beiden Versuchsständen zeigen bei steigender Gasbelastung einheitlich eine Zunahme gasseitiger volumetrischer Stoffübergangskoeffizienten k_{Ga_e} . Außerdem ist eine positive Korrelation zur Berieselungsdichte aus den Ergebnissen der Versuche bei den Berieselungsdichten von 10 und 30 m h^{-1} ableitbar.

Am Versuchsstand V-422 ermittelte Ergebnisse zu k_{Ga_e} weisen eine gute Übereinstimmung mit Vergleichsdaten der Literatur auf. Bei hohen Gasbelastungen sind Literaturdaten zur Packung RSP 250Y etwas höher als die ermittelten. Eigene Ergebnisse zur Packung RMP N 250Y am V-422 sind im Vergleich zu äquivalenten Versuchsdaten von Rejl et al [56] und Wang (2015) geringfügig erhöht. Ergebnisse zu k_{Ga_e} am Versuchsstand V-150 zeigen ebenfalls eine weitgehende Übereinstimmung mit den Literaturdaten. Jedoch sind deren Verläufe etwas steiler und bei niedrigen Berieselungsdichten geringer als Literaturvergleichsdaten zur Packung RSP 250Y und RMP N 250X.

An den Versuchsständen zeigt sich bezüglich k_{Ga_e} ein ähnliches Verhalten der Packungen zueinander (cf. Tabelle 9, Tabelle 10). Die Packungsgeometrie RMP N 250X mit ihrem Profilierungswinkel von 60° weist dabei um über 20% geringere k_{Ga_e} als die RMP N 250Y mit dem flacheren Profilierungswinkel von 45° auf ($u_L = 30 \text{ m/h}$). Die Packungsgeometrie RMP SP 250 verhält sich in den Versuchen betreffend k_{Ga_e} beinahe gleich wie die RMP N 250X. Auch die Packungsgeometrien RMP N 250Y und RSP 250Y zeigen zumindest bei einer Berieselungsdichte von 30 m h^{-1} ein ähnliches Verhalten von k_{Ga_e} . Deren vergleichsweise große k_{Ga_e} sind aber mit höherem Druckverlust verbunden.

Am Versuchsstand V-150 bei niedriger Gasbelastung ermittelte k_{Ga_e} sind geringer als am V-422. Mit steigender Gasbelastung nehmen die Abweichungen der Ergebnisse zwischen den Versuchsständen ab (cf. Tabelle 11, Abbildung 35, Abbildung 36, Abbildung 37). Dieses Verhalten ist wahrscheinlich auf den Einfluss des Kolonnendurchmessers zurückzuführen. Der Randbereich am V-150 nimmt einen vergleichsweise großen Anteil des Messkolonnenquerschnitts ein. Gerade bei niedriger Berieselungsdichte könnte ein Teil des Gases bevorzugt in diesen Randbereichen vorbeiströmen und damit weniger am intensiveren Stofftransport im Packungsinnen teilnehmen (Kurzschlussströmungen). An den Versuchsständen wurden etwas andere Packungshöhen und verschiedene Flüssigkeitsverteiler bei den Messungen eingesetzt. Daher ist eine unterschiedlich ausgeprägte Maldistribution der Phasen nicht auszuschließen. Außerdem war die Position der Reingassonden nicht ident (cf. Kapitel 3.1). Die Position der Reingassonde am Versuchsstand V-422 über dem Flüssigkeitsverteiler anstatt direkt über der Packung könnte theoretisch eine höhere gemessene Abscheidung aufgrund sekundärer Phasengrenzflächen bewirken. Während der Versuche wurde jedoch bei regelmäßigen Kontrollen kaum bis an die Oberfläche des Flüssigkeitsvertailers mitgerissene Flüssigkeit festgestellt.

Bei Versuchen zur Bestimmung von k_{Ga_e} sind Austrittskonzentrationen in der Nähe der unteren Messbereichsgrenze des Gasanalysators aufgetreten. Daher ist besonders bei geringen Gasbelastungen von einer erhöhten Messunsicherheit auszugehen. An stationären Betriebszuständen gemessene SO_2 -Konzentrationsverläufe wiesen hingegen stets vernachlässigbar geringe Schwankungen um einen konstanten Mittelwert auf. Die Kalibration des Gasanalysators wurde vor Versuchen mittels Prüfgasen kontrolliert. Eine zuverlässige Reproduktion gemessener SO_2 -Konzentration wurde in Vorversuchen bei versuchsähnlichen Bedingungen nachgewiesen.

6 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde an zwei Versuchseinrichtungen unterschiedlichen Maßstabs die experimentelle Bestimmung der Stofftransportparameter effektive Phasengrenzflächen a_e , sowie flüssigkeitsseitige und gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten (k_{La_e} und k_{Ga_e}) geordneter Packungen ermöglicht und durchgeführt. Dabei ermittelte Parameter können zur Auslegung und Modellierung von Packungskolonnen verwendet werden.

In einem ersten Schritt wurden theoretische Grundlagen zur Bestimmung dieser Stofftransportparameter gesammelt. Nach Auswahl geeigneter Messverfahren zur Stofftransportparameter-Bestimmung wurden diese an den Versuchsständen mit Kolonnen-Durchmessern von 422 beziehungsweise 150 mm implementiert. Im Anschluss an die entsprechende Vorbereitung der Versuchseinrichtungen wurden an diesen jeweils die Stofftransportparameter a_e , k_{La_e} und k_{Ga_e} der Packungsgeometrien RMP N 250Y, RMP N 250X, RMP SP 250 und RSP 250Y untersucht. Dabei handelt es sich um geordnete Metallpackungen. Die hierfür verwendeten Anlagenkonfigurationen und angewandten Messverfahren sind ausführlich in dieser Arbeit dokumentiert.

Die ermittelten Stofftransportparameter wurden mit Angaben anderer Forschungsgruppen verglichen. Ermittelte effektive Phasengrenzflächen wurden dazu empirischen Literaturmodellen gegenübergestellt. Ergebnisse volumetrischer Stoffübergangskoeffizienten wurden mit äquivalenten Versuchsergebnissen aus der Literatur verglichen. Die Versuchsergebnisse dieser Arbeit zu den untersuchten Stofftransportparametern entsprechen weitgehend den herangezogenen Literaturquellen.

Basierend auf den ermittelten Stofftransportparametern sind die untersuchten Packungsgeometrien untereinander verglichen worden. Diesbezüglich zeigte sich an den Versuchsständen ein ähnliches Verhalten. Erklärungen von dabei teilweise aufgetretenen Unterschieden zwischen Packungsgeometrien könnten in deren inneren Aufbau liegen. In diesem Zusammenhang wurden auch relative fluiddynamische Eigenschaften der Packungsgeometrien zueinander beschrieben. Solche Erkenntnisse zu Auswirkungen verschiedener Geometrien auf Packungseigenschaften können als Hilfestellung zur Auswahl geeigneter Packungen dienen.

Schließlich wurden Unterschiede zwischen an beiden Versuchsständen ermittelten Stofftransportparametern gleicher Packungsgeometrien festgestellt. Bei der Diskussion von diesbezüglichen anlagenübergreifenden Vergleichen wurden auch anlagenspezifische Differenzen berücksichtigt. Effektive Phasengrenzflächen a_e sind am kleinen Versuchsstand um bis zu 25 % geringer. Die Ursache hierfür liegt vermutlich im kleineren Kolonnenquerschnitt. Ergebnisse zu flüssigkeitsseitigen volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten k_{La_e} liegen an beiden Versuchsständen in etwa demselben Bereich. Für diese Versuche wurden jedoch deutlich höhere Packungen am kleinen Versuchsstand eingesetzt. Für gasseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizienten k_{Ga_e} resultierten besonders bei geringer Gasbelastung am größeren Versuchsstand höhere Werte. Mit zunehmender Gasbelastung nähern sich ermittelte k_{Ga_e} der beiden Versuchsstände tendenziell an. Hier sind wahrscheinlich Effekte im Randbereich des Kolonnenquerschnitts für das beobachtete Verhalten ursächlich.

6.1 Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde am Lehrstuhl ein erheblicher Fortschritt zur systematischen Bestimmung von Stofftransportparametern trennwirksamer Einbauten erzielt. Zurzeit sind Faktoren wie beispielsweise der Einfluss unterschiedlicher Packungshöhen oder der Flüssigkeitsaufgabe noch unbestimmt. Weitere Erforschung solcher Themen stellt die Voraussetzung einer fundierten Anwendbarkeit ermittelter Packungseigenschaften auf konkrete Fragestellungen dar. Außerdem erlaubt eine ausreichende Kenntnis der Auswirkungen abweichender Rahmenbedingungen bei Versuchen auf ermittelte Stofftransportparameter a_e , $k_L a_e$ und $k_G a_e$ eine Gewährleistung deren Kompatibilität untereinander. Damit wäre, falls erforderlich, die Berechnung der Stoffübergangskoeffizienten k_L und k_G möglich. Ferner könnten andere Messverfahren unter Verwendung alternativer Stoffsysteme an den Versuchseinrichtungen erprobt werden, um einerseits bestehende zu validieren und andererseits weitere Absorptionsprozesse abzubilden. Nachdem sonstige Einflüsse weitestgehend geklärt sind, könnte auch die Auswirkung des Kolonnendurchmessers empirisch vertiefend untersucht werden. Daraus ließen sich in weiterer Folge zuverlässige Skalierungsfaktoren entwickeln. Somit wäre es möglich, von unter relativ geringem Aufwand ermittelten Testresultaten im kleinen Maßstab beispielsweise auf das Verhalten in Pilotanlagen zu schließen (Scale-up). Außerdem ist es vorstellbar auf Basis von zusätzlichen Untersuchungen zahlreicher Packungsgeometrien differenzierte Modelle zur Vorhersage von Stofftransportparametern zu entwickeln.

7 Verzeichnisse

7.1 Symbolverzeichnis

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|---|---|----------------------|
| A | Phasengrenzfläche | m^2 |
| a_e, a_e' | Effektive (volumenbezogene) Phasengrenzfläche | m^2/m^3 |
| $a_{i,j}$ | Aktivität | o. D. |
| A_K | Kolonnenquerschnittsfläche | m^2 |
| A_P | Packungsoberfläche | m^2 |
| a_p | Spezifische Packungsoberfläche | m^2/m^3 |
| a_w | Benetzte Packungsoberfläche | m^2/m^3 |
| c_{CO_2} | Carbonat-Konzentration | mol/L |
| c_{OH^-} | Hydroxidionen-Konzentration | mol/L |
| d | Durchmesser | m, cm, mm |
| $D_{i,j}$ | Diffusionskoeffizient | m^2/s |
| E | Enhancement-Faktor | o. D. |
| F | F-Faktor, Gasbelastung | $Pa^{1/2}$ |
| f | Messsignal-Wert | ppm |
| Fr_L' | Froude-Zahl | o. D. |
| g | Erdbeschleunigung | m/s^2 |
| \dot{G} | Gasstrom | mol/s |
| $H_{i,j}$ | Henry-Konstante (Löslichkeitskonstante) | $mol/(m^3 \cdot Pa)$ |
| h_L | Dynamischer Flüssigkeitsinhalt (Hold-up) | m^3/m^3 |
| $h_{Na^+}, h_{OH^-}, h_{CO_3^{2-}}, h_{CO_2}$ | Beiträge zur Henry-Konstanten-Berechnung | L/mol |
| HTU_{OG} | Height of Transfer Units, overall gas (Höhe einer Übertragungseinheit, bezogen auf Gasphase) | m |
| i | Komponente | o. D. |
| ID | Inner Diameter, Innendurchmesser | mm |
| I_i | Ionenstärke | mol/L |
| j | Medium | o. D. |
| $k, k_j, k_j', k_{i,j}$ | Stoffübergangskoeffizient | m/s |
| $k_G a_e$ | gasseitiger volumetrischer Stoffübergangskoeffizient | s^{-1} |
| K_i | Gleichgewichtskoeffizient | o. D. |
| $K_{i,j}$ | Henry-Flüchtigkeitskonstante | $(m^3 \cdot Pa)/mol$ |
| $k_L a_e$ | flüssigkeitsseitiger volumetrischer Stoffübergangskoeffizient | s^{-1} |
| $k_{OG}, k_{OG}', k_{i,OG}$ | Stoffdurchgangskoeffizient bezogen auf Gasphase | m/s |
| $k_{OG} a_e$ | Vol. Stoffdurchgangskoeffizient bezogen auf Gasphase | s^{-1} |
| k_{OH^-} | Geschwindigkeitskonstante | $m^3/(mol \cdot s)$ |
| $k_{OH^-}^\infty$ | Geschwindigkeitskonstante bei unendlicher Verdünnung | $m^3/(mol \cdot s)$ |
| $k_{OL}, k_{i,OL}$ | Stoffdurchgangskoeffizient bezogen auf flüssige Phase | m/s |
| $k_{OL} a_e$ | Vol. Stoffdurchgangskoeffizient bezogen auf flüssige Phase | s^{-1} |
| L | Charakteristische Länge | m |
| \dot{L} | Liquidstrom | mol/s |
| m | Steigungsmaß Gleichgewichtsgerade | o. D. |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|-------------------------------------|---|---|
| M_G | Molare Masse Gas | kg/mol |
| M_L | Molare Masse Flüssigkeit | kg/mol |
| n | Anzahl | o. D. |
| n_I | Intervall-Anzahl | o. D. |
| $\dot{n}, \dot{n}_i, \dot{n}_{i,j}$ | Stoffmengenstrom | mol/s |
| NTU _{OG} | Number of Transfer Units, overall gas (Anzahl der Übertragungseinheiten, bezogen auf Gasphase) | o. D. |
| R | Universelle Gaskonstante | J/(mol·K) |
| Re_L | Reynolds-Zahl | o. D. |
| S, S_o, S_u | Integral des Messsignals über die Signaldauer | ppm·s |
| $T_{G,u}$ | Gastemperatur Messkolonneneintritt (unten) | K, °C |
| $T_{G,o}$ | Gastemperatur Messkolonnenaustritt (oben) | K, °C |
| T_L | Flüssigkeitstemperatur | K, °C |
| T_{sys} | Mittlere Fluid-Temperatur | K, °C |
| u_G | Gas-Leerrohrgeschwindigkeit | m/s, m/h, m ³ /(m ² ·h) |
| u_L | Berieselungsdichte (Leerrohrgeschw. flüssige Phase) | m/s, m/h, m ³ /(m ² ·h) |
| \dot{V}_G | Gasvolumenstrom | m ³ /s |
| V_L | Flüssigkeitsvolumen in Messkolonne | m ³ |
| V_P | Durch Packung eingenommenes Zylindervolumen | m ³ |
| We_L | Weber-Zahl | o. D. |
| x_i | Stoffmengenanteil Flüssigkeits-Kernphase | mol/mol |
| x_i^* | Gleichgewichts-Stoffmengenanteil in flüssiger Phase | mol/mol |
| $x_{i,o}, y_{i,o}$ | Konzentrationsmaß in Messkolonne über Packung | ppm, mol/mol |
| $x_{i,ph}$ | Stoffmengenanteil Flüssigkeitsphase an Phasengrenze | mol/mol |
| $x_{i,u}, y_{i,u}$ | Konzentrationsmaß in Messkolonne unter Packung | ppm, mol/mol |
| Y | Molbeladung Gasphase | mol/mol |
| y_i | Stoffmengenanteil Gas-Kernphase | ppm |
| y_i^* | Gleichgewichts-Stoffmengenanteil in Gas | ppm |
| $y_{i,ph}$ | Stoffmengenanteil Flüssigkeitsphase an Phasengrenze | ppm |
| Z | Eingebaute Packungshöhe | m |
| δ | Grenzschichtdicke | m |
| Δc | Konzentrationsdifferenz | mol/L |
| Δp | Druckdifferenz | Pa, hPa |
| Δt | Zeitintervall | s |
| $\eta_{i,j}$ | Absorptions- oder Desorptionsgrad | % |
| η_{Song} | Modellparameter Song (2017) | o. D. |
| μ_{H_2O} | Dynamische Viskosität Wasser | Pa·s, mPa·s |
| $\mu_{i,j}^\circ$ | Chemisches Standardpotential | J/mol |
| μ_L | Dynamische Viskosität Flüssigkeit | Pa·s, mPa·s |
| $\tilde{\rho}_G$ | Molare Gasdichte | mol/m ³ |
| ρ_L | Flüssigkeitsdichte | kg/m ³ |
| ρ_L | Gasdichte | kg/m ³ |
| $\tilde{\rho}_L$ | Molare Flüssigkeitsdichte | mol/m ³ |
| σ | Oberflächenspannung | N/m |
| σ_c | Kritische Oberflächenspannung | N/m |

7.2 Literaturverzeichnis

- [1] A. Mersmann, M. Kind und J. Stichlmair, Thermische Verfahrenstechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [2] K. Sattler, Thermische Trennverfahren, 3. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH, 2001.
- [3] B. Lohrengel, Einführung in die thermischen Trennverfahren, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2012.
- [4] L. Spiegel und W. Meier, „Distillation Columns With Structured Packings in the next Decade,“ *Institution of Chemical Engineers, Vol 81, Part A*, pp. 39-47, 2003.
- [5] M. Wehrli und L. Spiegel, „Chemische Verfahrenstechnik für die Industrie seit 1946,“ *Sulzer Technical Review*, Nr. 3, pp. 21-26, 2019.
- [6] A. L. Kohl und R. B. Nielsen, Gas Purification, Fifth Edition, Gulf Publishing Company, 1997.
- [7] Sulzer Ltd., „Natural Gas Dehydration: Optimized TEG Contactor Design,“ [Online]. Available: https://www.sulzer.com/germany/-/media/files/products/separation-technology/separators/natural_gas_dehydration_a10358_en_210113_web1.pdf?la=en. [Zugriff am 26 Oktober 2022].
- [8] Normenausschuss-KRdL, VDI 3679, Blatt 2, Nassabscheider, Abgasreinigung durch Absorption (Wäscher), Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [9] C. E. Mortimer und U. Müller, Chemie, 10. Auflage, Georg Thieme Verlag KG, 2010.
- [10] A. Hoffmann, J. F. Maćkowiak, A. Górak, M. Haas, J.-M. Löning, T. Runowski und K. Hallenberger, „Standardization Of Mass Transfer Measurements, A Basis for the Description of Absorption Processes,“ *Chemical Engineering Research and Design* 85, pp. 40-49, 2007.
- [11] J. F. Rejl, V. Linek, T. Moucha und L. Valenz, „Methods Standardization in the Measurement of Mass-Transfer Characteristics in Packed Absorption Columns,“ *Chemical Engineering Research and Design* 87, pp. 695-704, 2009.
- [12] L. Hegely, J. Roesler, P. Alix, D. Rouzineau und M. Meyer, „Absorption Methods for the Determination of Mass Transfer Parameters of Packing Internals: A Literature Review,“ *American Institute of Chemical Engineers*, pp. 3246-3275, 2017.

- [13] VDI-GVC, VDI 2761, Blatt 2, Thermische Trennverfahren in der Verfahrenstechnik, Messung und Auswertung von Fluidodynamik und Stofftransport in gepackten Kolonnen, Absorption und Desorption, Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH, 2020.
- [14] S. Pesendorfer, „Optimierung der hydraulischen Vermessung einer Absorptionskolonne,“ *Masterarbeit*, 2018.
- [15] G. Haushofer, „Planung, Bau und Inbetriebnahme einer Packungskolonne im Technikumsmaßstab,“ *Masterarbeit*, 2020.
- [16] A. Mersmann, Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1980.
- [17] M. Schultes, Abgasreinigung: Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Vergleichsverfahren, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [18] S. Schug, „Untersuchung der Fluidodynamik in Packungskolonnen mittels Computertomographie,“ *Dissertation*, 2018.
- [19] Sulzer Ltd., „Structured Packings,“ [Online]. Available: https://www.sulzer.com/germany/-/media/files/products/separation-technology/distillation-and-absorption/brochures/structured_packings.pdf?la=en. [Zugriff am 17 Oktober 2022].
- [20] W. K. Lewis und W. G. Whitman, „Principles of Gas Absorption,“ *Industrial and Engineering Chemistry*, pp. 1215-1220, 1924.
- [21] P. W. Atkins und J. d. Paula, Kurzlehrbuch Physikalische Chemie, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2020.
- [22] U. Feuerriegel, Verfahrenstechnik mit Excel, Springer Vieweg, 2016.
- [23] M. Kraume, Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [24] R. Sander, „Compilation of Henry’s Law Constants (version 4.0) for Water as Solvent,“ *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 4399–4981, 2015.
- [25] M. Schlager, G. Haushofer, A. Triebel, V. Wolf-Zöllner und M. Lehner, „Determination of Volumetric Mass Transfer Coefficients of Structured Packings at two different Column Diameters,“ *Chemical Engineering Research and Design* 186, pp. 462-472, 2022.
- [26] R. E. Tsai, „Mass Transfer Area of Structured Packing,“ *Dissertation*, 2010.

- [27] C. Wang, „Mass Transfer Coefficients and Effective Area of Packing,“ *Dissertation*, 2015.
- [28] D. Song, „Effect of Liquid Viscosity on Liquid Film Mass Transfer for Packings,“ *Dissertation*, 2017.
- [29] K. Onda, H. Takeuchi und O. Yoshio, „Mass Transfer Coefficients between Gas and Liquid Phases in Packed Columns,“ *Journal of Chemical Engineering of Japan*, pp. 56-62, 1968.
- [30] C. Wang, D. Song, F. A. Seibert und G. T. Rochelle, „Dimensionless Models for Predicting the Effective Area, Liquid-Film, and Gas-Film Mass-Transfer Coefficients of Packing,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016.
- [31] D. Song, A. F. Seibert und G. T. Rochelle, „Mass Transfer Parameters for Packings: Effect of Viscosity,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017.
- [32] M. Baumfrisch, „Technische Zusammenhänge und Betriebsanleitung einer Absorptionskolonne im Technikumsmaßstab zur Vermessung von Packungen und Füllkörperschüttungen,“ *Bachelorarbeit*, 2021.
- [33] Asea Brown Boveri, EasyLine Kontinuierliche Gasanalysatoren: Modelle EL3020, EL3040, 2006.
- [34] S. Schmidt, „Entwicklung von Zweikomponentenverfahren für die nichtdispersive IR Spektroskopie (NDIR) mit Hilfe von chemometrischen Methoden,“ *Dissertation*, 2003.
- [35] National Institute of Standards and Technology, „Carbon Dioxide,“ [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Type=IR-SPEC&Index=1#IR-SPEC>. [Zugriff am 17 Oktober 2022].
- [36] National Institute of Standards and Technology, „Sulfur Dioxide,“ [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7446095&Index=0&Type=IR-SPEC>. [Zugriff am 17 Oktober 2022].
- [37] M&C TechGroup Germany, [Online]. Available: <https://www.mc-techgroup.com/en/products-special-systems/gas-conditioning/gas-conditioning-systems/01g6010>. [Zugriff am 28 Oktober 2022].
- [38] Sulzer Ltd., [Online]. Available: <https://www.sulzer.com/de-ch/germany/products/separation-technology/structured-packings>. [Zugriff am 28 Oktober 2022].
- [39] Koch Engineered Solutions, [Online]. Available: <https://koch-glitsch.com/products/packing-and-internals?productcategory=packing-and-internals&categoryname=Structured-Packing>. [Zugriff am 28 Oktober 2022].

- [40] AMACS Process Tower Internals, [Online]. Available: <https://amacs.com/packing/structured/>. [Zugriff am 28 Oktober 2022].
- [41] RVT Process Equipment GmbH, „Standardpackungen,“ [Online]. Available: <https://www.rvtpe.com/global/de/produkte/geordnete-packungen/standardpackungen>. [Zugriff am 17 Oktober 2022].
- [42] RVT Process Equipment GmbH, „High Performance Packings,“ [Online]. Available: <https://www.rvtpe.com/global/en/products/structured-packings/high-performance-packings>. [Zugriff am 2 November 2022].
- [43] M. Schultes, „Raschig Super-Pak – Eine neue Packungsstruktur mit innovativen Vorteilen im Vergleich,“ *Chemie Ingenieur Technik* 80, No. 7, pp. 927-933, 2008.
- [44] R. E. Tsai, A. F. Seibert, R. B. Eldridge und G. T. Rochelle, „A Dimensionless Model for Predicting the Mass-Transfer Area of Structured Packing,“ *American Institute of Chemical Engineers*, pp. 1173-1184, 2010.
- [45] L. Gros, P. A. Bruttel und M. v. Kloeden, Metrohm: Praktikum der Titration, Metrohm AG, Schweiz, 2005.
- [46] M. D. Hilliard, „A Predictive Thermodynamic Model for an Aqueous Blend of Potassium Carbonate, Piperazine, and Monoethanolamine for Carbon Dioxide Capture from Flue Gas,“ *Dissertation*, 2008.
- [47] R. Pohorecki und W. Moniuk, „Kinetics of Reaction between Carbon Dioxide and Hydroxyl Ions in Aqueous Electrolyte Solutions,“ *Chemical Engineering Science*, pp. 1677-1684, 1988.
- [48] R. Pohorecki und W. Moniuk, „Plate Efficiency in the Process of Absorption with Chemical Reaction Experiments and Example Calculations,“ *The Chemical Engineering Journal*, pp. 37-46, 1988.
- [49] B. E. Poling, J. M. Prausnitz und J. P. O'Connell, *The Properties of Gases and Liquids*, Fifth Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- [50] VDI-GVC, VDI Wärmeatlas, 11. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [51] R. Eötvös, „Über den Zusammenhang der Oberflächenspannung der Flüssigkeiten mit ihrem Molecularvolumen,“ *Annalen der Physik, Band 263, Nr. 3*, p. 448–459, 1886.
- [52] J. L. Bravo und J. R. Fair, „Generalized Correlation for Mass Transfer in Packed Distillation,“ *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, pp. 162-170, 1982.

- [53] K. G. Nayar, M. H. Sharqawy, L. D. Banchik und J. H. L. V, „Thermophysical Properties of Seawater: A Review and New correlations,“ *Desalination* 390, pp. 1-24, 2016.
- [54] M. Laso, M. Henriques de Brito, P. Bomio und U. von Stockar, „Liquid-side Mass Transfer Characteristics of a Structured Packing,“ *Chemical Engineering Journal*, 1995.
- [55] L. Valenz, F. J. Rejl, J. Šíma und V. Linek, „Absorption Mass- Transfer Characteristics of Mellapak Packings Series,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, p. 12134–12142, 2011.
- [56] F. J. Rejl, L. Valenz, J. Haidl, M. Kordač und T. Moucha, „On the Modeling of Gas-phase Mass- Transfer in Metal Sheet Structured Packings,“ *Chemical Engineering Research and Design*, 2014.
- [57] F. J. Rejl, L. Valenz, J. Haidl, M. Kordač und T. Moucha, „Hydraulic and Mass-transfer Characteristics of Raschig Super-Pak 250Y,“ *Chemical Engineering Research and Design*, pp. 20-27, 2015.
- [58] A. K. Kunze, P. Lutze, M. Kopatschek, J. F. Maćkowiak, J. Maćkowiak, M. Grünewald und A. Górak, „Mass Transfer Measurements in Absorption and Desorption: Determination of Mass Transfer Parameters,“ *Chemical Engineering Research and Design*, pp. 440-452, 2015.
- [59] D. Flagiello, F. DiNatale, A. Lancia und A. Erto, „Characterization of Mass Transfer Coefficients and Pressure Drops for Packed Towers with Mellapak 250.X,“ *Chemical Engineering Research and Design*, pp. 340-356, 2020.

7.3 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|------|
| Tabelle 1: Legende zum Verfahrensfließschema in Abbildung 3. | 18 |
| Tabelle 2: Eingesetzte Messtechnik an den Versuchsständen..... | 20 |
| Tabelle 3: Übersicht untersuchter Packungsgeometrien. | 22 |
| Tabelle 4: Dokumentation eingebauter Packungshöhen je Messverfahren und Versuchsstand..... | 23 |
| Tabelle 5: Übersicht zur Bestimmung von Stofftransportparameter verwendeter Stoffsysteme. | 26 |
| Tabelle 6: Ergänzende Legende zum Verfahrensfließschema in Abbildung 9 (Bestimmung a_e). | 29 |
| Tabelle 7: Ergänzende Legende zu den Schemata in Abbildung 10 und Abbildung 11 (Bestimmung von $k_L a_e$). | 32 |
| Tabelle 8: Ergänzende Legende zum Verfahrensfließschema in Abbildung 13 (Bestimmung $k_G a_e$).... | 36 |
| Tabelle 9: Übersicht ermittelter relativer Stofftransportparameter der Packungen am Versuchsstand V-422. | 61 |
| Tabelle 10: Übersicht ermittelter relativer Stofftransportparameter der Packungen am Versuchsstand V-150. | 62 |
| Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse an den Versuchsständen relativ zueinander (V-150 zu V-422). 63 | |
| Tabelle 12: Versuchsdaten zu fluiddynamischen Eigenschaften am Versuchsstand V-422. | I |
| Tabelle 13: Versuchsdaten zu fluiddynamischen Eigenschaften am Versuchsstand V-150. | IX |
| Tabelle 14: Versuchsdaten zu a_e am Versuchsstand V-422. | XV |
| Tabelle 15: Versuchsdaten zu a_e am Versuchsstand V-150. | XVI |
| Tabelle 16: Versuchsdaten zu $k_L a_e$ am Versuchsstand V-422. | XVII |
| Tabelle 17: Versuchsdaten zu $k_L a_e$ am Versuchsstand V-150. | XIX |
| Tabelle 18: Versuchsdaten zu $k_G a_e$ am Versuchsstand V-422..... | XX |
| Tabelle 19: Versuchsdaten zu $k_G a_e$ am Versuchsstand V-150..... | XXI |

7.4 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Trennprinzip der Absorption mit Regeneration des Absorbens nach Sattler [2]. | 6 |
| Abbildung 2: Aufbau einer Packungs- bzw. Füllkörperkolonne [8]. | 7 |
| Abbildung 3: Verfahrensfließschema der Versuchsstände V-422 und V-150. | 17 |
| Abbildung 4: Absorptionsspektren von CO ₂ [35] und SO ₂ [36]. | 21 |
| Abbildung 5: Frontalansicht RMP N 250Y. | 23 |
| Abbildung 6: Frontalansicht RMP N 250X. | 24 |
| Abbildung 7: Frontalansicht RMP SP 250. | 24 |
| Abbildung 8: Frontalansicht RSP 250Y. | 25 |
| Abbildung 9: Verfahrensfließschema der Anlagenkonfiguration zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen a_e . | 29 |
| Abbildung 10: Verfahrensfließschema der Anlagenkonfiguration zur Bestimmung flüssigkeitsseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$. | 31 |
| Abbildung 11: Verfahrensfließschema des CO ₂ -Anreicherungsmoduls zur Vorbereitung eintretender Flüssigkeit bei Desorptionsversuchen zur Bestimmung von $k_L a_e$. | 32 |
| Abbildung 12: Skizze des Versuchsaufbaus zur Analyse des CO ₂ -Gehalts von Flüssigkeitsproben. | 34 |
| Abbildung 13: Verfahrensfließschema der Anlagenkonfiguration zur Bestimmung gasseitiger vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_G a_e$. | 36 |
| Abbildung 14: Typischer CO ₂ -Konzentrationsverlauf $f(t)$ im Trägergas während der Flüssigkeitsprobenanalyse. | 41 |
| Abbildung 15: a) Spezifischer Druckverlust RMP N 250Y; b) Dynamischer Hold-up RMP N 250Y. | 45 |
| Abbildung 16: Reihung der Packungsgeometrien nach fluiddynamischem Verhalten. | 45 |
| Abbildung 17: Ergebnisse zu am Versuchstand V-422 ermittelten a_e ($F = 1 \text{ Pa}^{1/2}$). | 46 |
| Abbildung 18: Ergebnisse zu am Versuchstand V-150 ermittelten a_e ($F = 1 \text{ Pa}^{1/2}$). | 47 |
| Abbildung 19: Ergebnisse zu am Versuchstand V-150 ermittelten a_e ($F = 0,5 \text{ Pa}^{1/2}$). | 47 |
| Abbildung 20: Vergleich von Ergebnissen der Methoden zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen bei einem F-Faktor $1,0 \text{ Pa}^{1/2}$. | 48 |
| Abbildung 21: Vergleich von Ergebnissen der Methoden zur Bestimmung effektiver Phasengrenzflächen bei einem F-Faktor $0,5 \text{ Pa}^{1/2}$. | 49 |
| Abbildung 22: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RMP N 250Y in Relation zu Literaturangaben. | 50 |
| Abbildung 23: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RMP N 250X in Relation zu Literaturangaben. | 50 |
| Abbildung 24: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RMP SP 250 in Relation zu Literaturangaben. | 51 |
| Abbildung 25: Ermittelte a_e der Packungsgeometrie RSP 250Y in Relation zu Literaturangaben. | 52 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 26: Ergebnisse zu am Versuchstand V-422 ermittelten k_{La_e} ($F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$)..... | 53 |
| Abbildung 27: Ergebnisse zu am Versuchstand V-150 ermittelten k_{La_e} ($F = 1,0 \text{ Pa}^{1/2}$)..... | 53 |
| Abbildung 28: Ermittelte k_{La_e} der Packungsgeometrie RMP N 250Y in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25]..... | 54 |
| Abbildung 29: Ermittelte k_{La_e} der Packungsgeometrie RMP N 250X in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25]..... | 55 |
| Abbildung 30: Ermittelte k_{La_e} der Packungsgeometrie RSP 250Y in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25]..... | 55 |
| Abbildung 31: Ergebnisse am V-422 ermittelter k_{Ga_e} (Berieselungsdichte $u_L = 10 \text{ m h}^{-1}$)..... | 56 |
| Abbildung 32: Ergebnisse am V-422 ermittelter k_{Ga_e} (Berieselungsdichte $u_L = 30 \text{ m h}^{-1}$)..... | 57 |
| Abbildung 33: Ergebnisse am V-150 ermittelter k_{Ga_e} (Berieselungsdichte $u_L = 10 \text{ m h}^{-1}$)..... | 57 |
| Abbildung 34: Ergebnisse am V-150 ermittelter k_{Ga_e} (Berieselungsdichte $u_L = 30 \text{ m h}^{-1}$)..... | 58 |
| Abbildung 35: Ermittelte k_{Ga_e} der Packungsgeometrie RMP N 250Y ($u_L = 30 \text{ m/h}$) in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25]. | 59 |
| Abbildung 36: Ermittelte k_{Ga_e} der Packungsgeometrie RMP N 250X ($u_L = 30 \text{ m/h}$) in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25]. | 59 |
| Abbildung 37: Ermittelte k_{Ga_e} der Packungsgeometrie RSP 250Y ($u_L = 30 \text{ m/h}$) in Relation zu Literaturangaben aus Schlager et al (2022) [25]. | 60 |

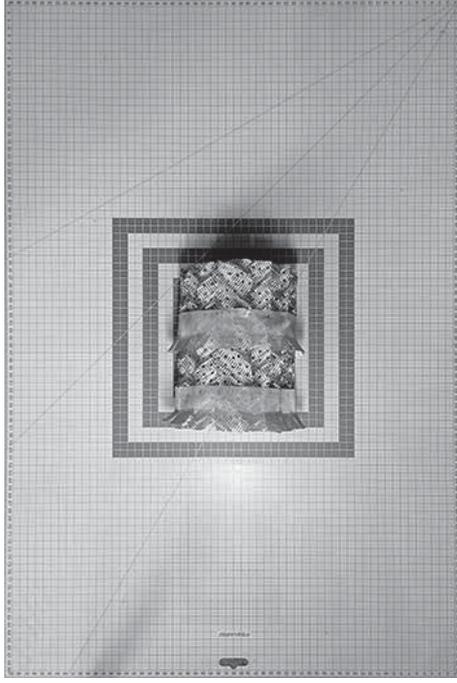
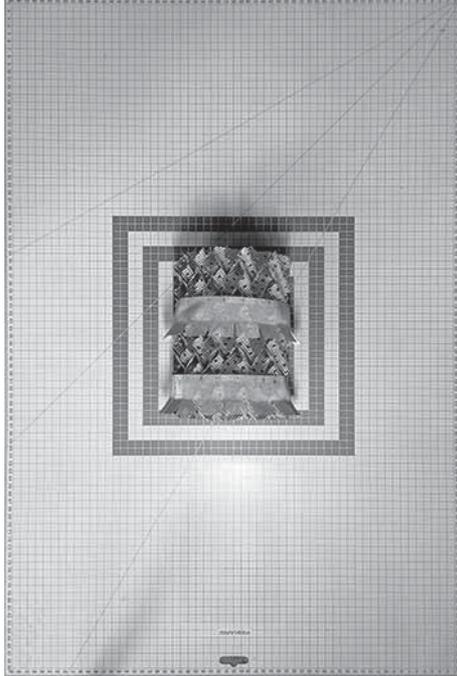
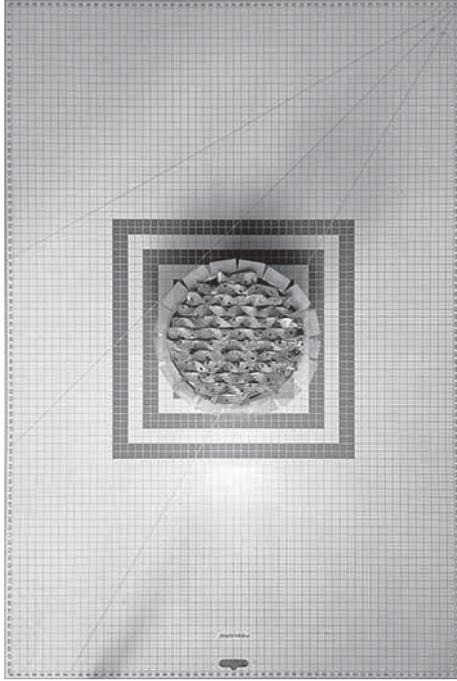
8 Anhang

Der Anhang dieser Arbeit beinhaltet eine Fotodokumentation sowie Versuchsdaten zu fluiddynamischen Eigenschaften und Stofftransportparameter untersuchter Packungen.

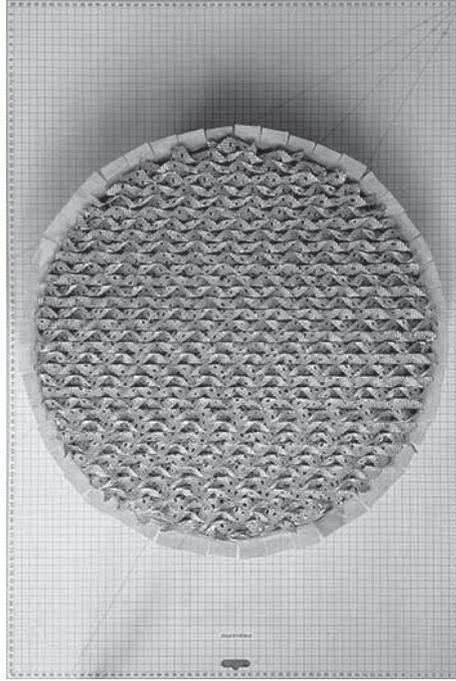
Anhang A: Fotodokumentation untersuchter Packungen

In diesem Abschnitt sind Fotos der in dieser Arbeit untersuchten Packungen enthalten. Es sind jeweils Ansichten von oben, vorne und der Seite gezeigt.

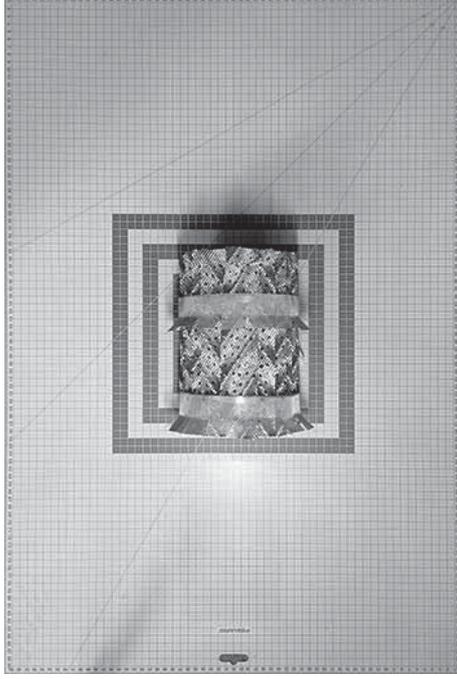
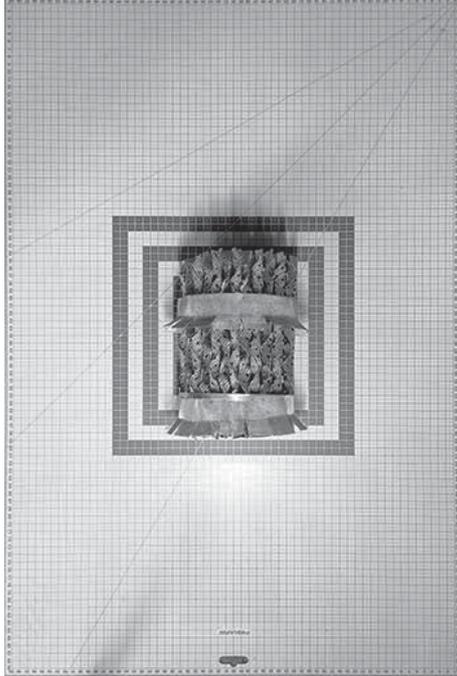
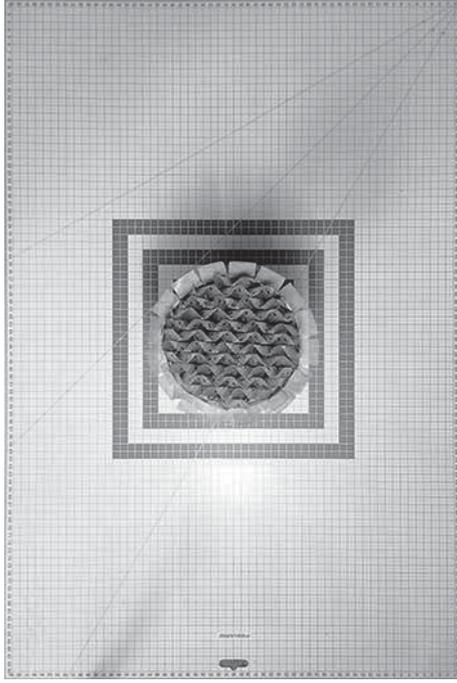
RMP N 250Y, $d = 150$ mm:



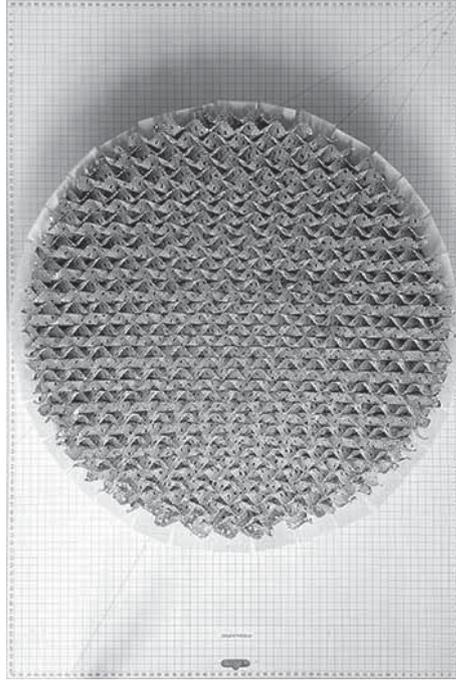
RMP N 250Y, $d = 422$ mm:



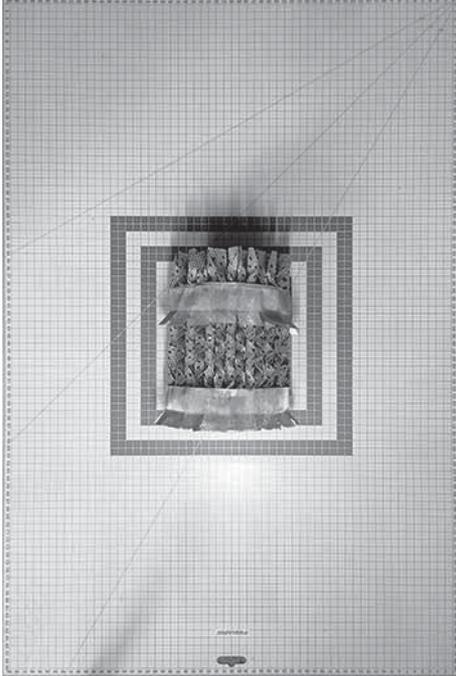
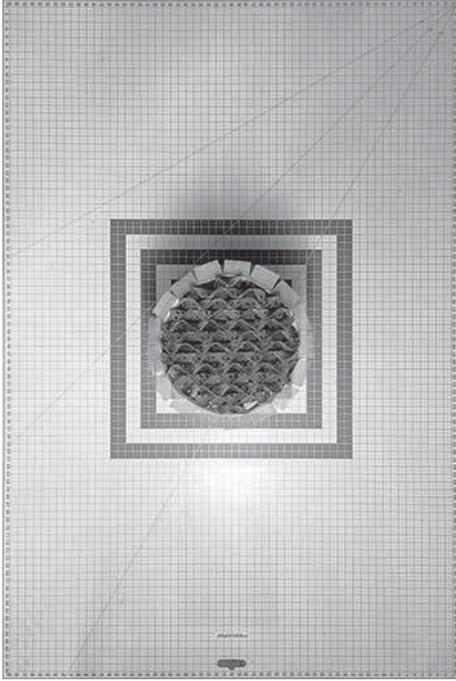
RMP N 250X, $d = 150$ mm:



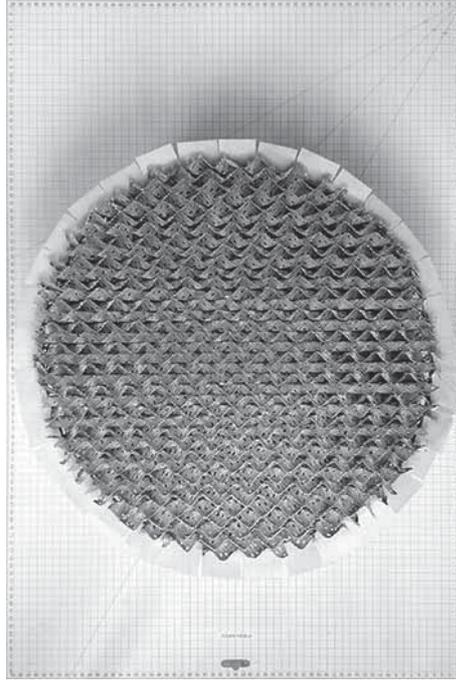
RMP N 250X, $d = 422$ mm:



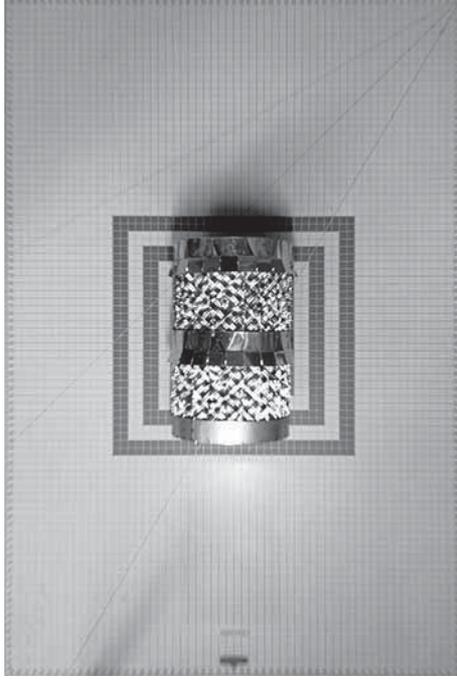
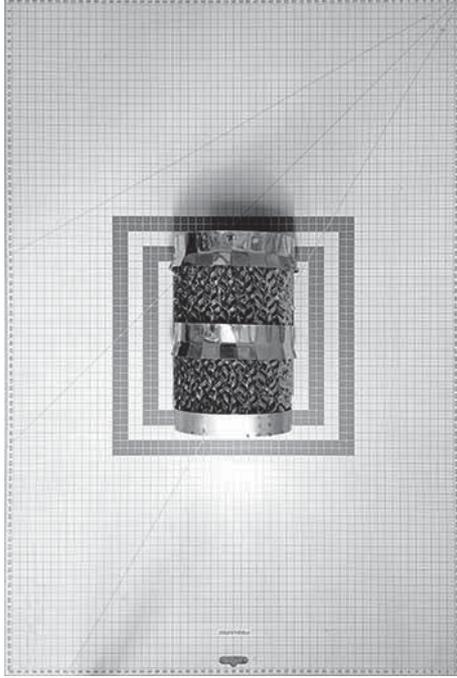
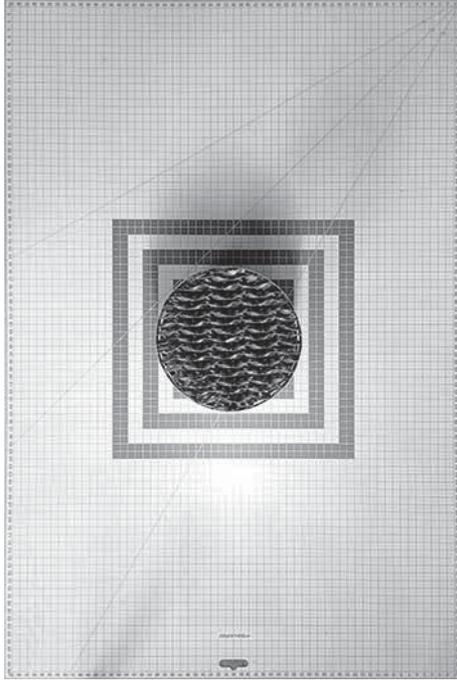
RMP SP 250, $d = 150$ mm:



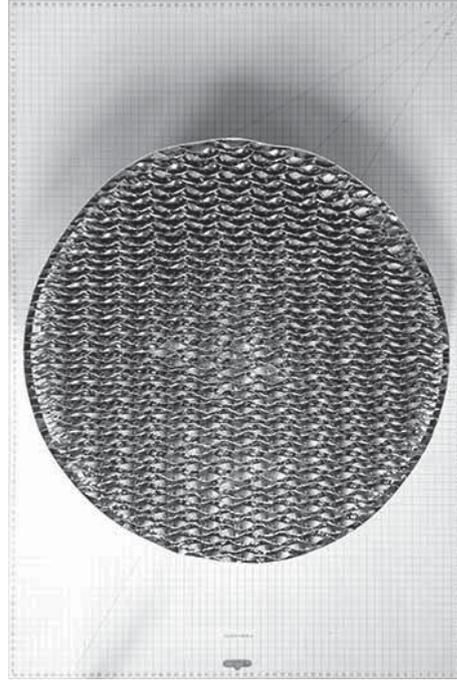
RMP SP 250, $d = 422$ mm:



RSP 250Y, $d = 150$ mm:



RSP 250Y, $d = 422$ mm:



Anhang B: Versuchsdaten zu fluiddynamischen Eigenschaften $\Delta p/Z$ und h_L

Tabelle 12: Versuchsdaten zu fluiddynamischen Eigenschaften am Versuchsstand V-422.

| Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,u}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250X | - | 0,6 | 20,0 | 17,1 | 0,03 | - |
| RMP N 250X | - | 1,2 | 20,0 | 16,8 | 0,15 | - |
| RMP N 250X | - | 1,6 | 20,0 | 16,5 | 0,27 | - |
| RMP N 250X | - | 2,0 | 20,0 | 16,2 | 0,44 | - |
| RMP N 250X | - | 2,6 | 20,0 | 16,0 | 0,69 | - |
| RMP N 250X | - | 3,1 | 20,0 | 15,9 | 0,97 | - |
| RMP N 250X | - | 3,6 | 20,0 | 15,8 | 1,29 | - |
| RMP N 250X | - | 4,1 | 20,0 | 15,6 | 1,67 | - |
| RMP N 250X | - | 4,7 | 20,0 | 15,4 | 2,25 | - |
| RMP N 250X | 10,0 | 0,5 | 19,0 | 16,7 | 0,02 | 0,04 |
| RMP N 250X | 10,0 | 1,0 | 19,0 | 16,5 | 0,11 | 0,04 |
| RMP N 250X | 10,0 | 1,5 | 19,0 | 16,4 | 0,26 | 0,04 |
| RMP N 250X | 10,0 | 2,1 | 19,0 | 16,2 | 0,46 | 0,04 |
| RMP N 250X | 10,0 | 2,4 | 19,0 | 16,0 | 0,60 | 0,04 |
| RMP N 250X | 10,0 | 2,7 | 19,0 | 15,8 | 0,77 | 0,04 |
| RMP N 250X | 10,0 | 3,0 | 19,0 | 15,7 | 0,98 | 0,04 |
| RMP N 250X | 10,0 | 3,3 | 19,0 | 15,5 | 1,63 | 0,05 |
| RMP N 250X | 10,0 | 3,6 | 19,0 | 15,2 | 2,66 | 0,05 |
| RMP N 250X | 10,0 | 3,9 | 19,0 | 15,0 | 4,11 | 0,06 |
| RMP N 250X | 10,0 | 4,2 | 20,0 | 14,8 | 6,32 | 0,07 |
| RMP N 250X | 10,0 | 4,6 | 20,0 | 14,5 | 8,55 | 0,09 |
| RMP N 250X | 10,0 | 4,8 | 20,0 | 14,2 | 10,14 | 0,10 |
| RMP N 250X | 20,0 | 0,5 | 20,0 | 15,2 | 0,04 | 0,05 |
| RMP N 250X | 20,0 | 1,0 | 20,0 | 15,0 | 0,15 | 0,05 |
| RMP N 250X | 20,0 | 1,5 | 20,0 | 14,8 | 0,30 | 0,05 |
| RMP N 250X | 20,0 | 2,1 | 20,0 | 14,7 | 0,52 | 0,05 |
| RMP N 250X | 20,0 | 2,6 | 20,0 | 14,5 | 0,81 | 0,05 |
| RMP N 250X | 20,0 | 3,1 | 20,0 | 14,4 | 1,89 | 0,05 |
| RMP N 250X | 20,0 | 3,4 | 20,0 | 14,3 | 3,65 | 0,06 |
| RMP N 250X | 20,0 | 3,7 | 20,0 | 14,1 | 7,13 | 0,08 |
| RMP N 250X | 20,0 | 3,9 | 20,0 | 14,0 | 11,99 | 0,12 |
| RMP N 250X | 20,0 | 4,1 | 20,0 | 13,9 | 13,51 | 0,13 |
| RMP N 250X | 30,0 | 0,6 | 19,0 | 16,8 | 0,06 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 1,1 | 19,0 | 16,3 | 0,19 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 1,5 | 19,0 | 15,7 | 0,36 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 2,1 | 19,0 | 15,3 | 0,64 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 2,3 | 19,0 | 15,1 | 0,77 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 2,5 | 20,0 | 15,0 | 0,92 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 2,7 | 20,0 | 14,9 | 1,07 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 2,9 | 20,0 | 14,8 | 1,26 | 0,07 |
| RMP N 250X | 30,0 | 3,0 | 20,0 | 14,8 | 2,01 | 0,08 |
| RMP N 250X | 30,0 | 3,1 | 20,0 | 14,7 | 2,74 | 0,09 |
| RMP N 250X | 30,0 | 3,2 | 20,0 | 14,7 | 4,23 | 0,12 |
| RMP N 250X | 40,0 | 0,6 | 20,0 | 15,9 | 0,06 | 0,09 |
| RMP N 250X | 40,0 | 1,0 | 20,0 | 15,9 | 0,19 | 0,09 |
| RMP N 250X | 40,0 | 1,5 | 20,0 | 15,8 | 0,40 | 0,09 |
| RMP N 250X | 40,0 | 2,1 | 20,0 | 15,7 | 0,69 | 0,09 |
| RMP N 250X | 40,0 | 2,4 | 20,0 | 15,6 | 0,90 | 0,09 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,u}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250X | 40,0 | 2,7 | 20,0 | 15,5 | 1,15 | 0,09 |
| RMP N 250X | 40,0 | 2,8 | 20,0 | 15,5 | 1,25 | 0,09 |
| RMP N 250X | 40,0 | 2,9 | 20,0 | 15,4 | 2,28 | 0,10 |
| RMP N 250X | 40,0 | 3,0 | 20,0 | 15,4 | 4,72 | 0,11 |
| RMP N 250X | 50,0 | 0,5 | 20,0 | 15,2 | 0,08 | 0,09 |
| RMP N 250X | 50,0 | 1,1 | 20,0 | 15,2 | 0,25 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 1,6 | 20,0 | 15,1 | 0,48 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,1 | 20,0 | 15,0 | 0,79 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,3 | 21,0 | 14,9 | 0,93 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,4 | 21,0 | 14,9 | 1,03 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,5 | 21,0 | 14,9 | 1,11 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,6 | 21,0 | 14,8 | 1,21 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,7 | 21,0 | 14,8 | 1,34 | 0,10 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,8 | 21,0 | 14,7 | 2,79 | 0,11 |
| RMP N 250X | 50,0 | 2,8 | 21,0 | 14,7 | 5,47 | 0,13 |
| RMP N 250X | 60,0 | 0,6 | 19,0 | 13,9 | 0,12 | 0,10 |
| RMP N 250X | 60,0 | 1,0 | 19,0 | 13,9 | 0,37 | 0,10 |
| RMP N 250X | 60,0 | 1,4 | 19,0 | 13,8 | 0,63 | 0,10 |
| RMP N 250X | 60,0 | 1,5 | 19,0 | 13,6 | 0,70 | 0,10 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,1 | 19,0 | 13,6 | 1,01 | 0,10 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,2 | 19,0 | 13,6 | 1,09 | 0,10 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,3 | 19,0 | 13,6 | 1,21 | 0,10 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,4 | 19,0 | 13,6 | 1,29 | 0,11 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,5 | 19,0 | 13,5 | 1,42 | 0,11 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,6 | 19,0 | 13,5 | 1,97 | 0,11 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,7 | 20,0 | 13,5 | 2,85 | 0,12 |
| RMP N 250X | 60,0 | 2,7 | 20,0 | 13,5 | 9,14 | 0,15 |
| RMP N 250X | 70,0 | 0,5 | 17,0 | 15,2 | 0,50 | 0,11 |
| RMP N 250X | 70,0 | 1,0 | 17,0 | 15,1 | 0,97 | 0,11 |
| RMP N 250X | 70,0 | 1,4 | 17,0 | 14,9 | 1,26 | 0,11 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,0 | 17,0 | 14,7 | 1,68 | 0,11 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,2 | 17,0 | 14,6 | 1,75 | 0,12 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,3 | 17,0 | 14,5 | 1,87 | 0,12 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,4 | 18,0 | 14,5 | 2,15 | 0,12 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,5 | 18,0 | 14,4 | 2,42 | 0,12 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,6 | 18,0 | 14,4 | 3,09 | 0,12 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,6 | 18,0 | 14,4 | 4,01 | 0,13 |
| RMP N 250X | 70,0 | 2,7 | 18,0 | 14,4 | 11,25 | 0,17 |
| RMP N 250X | 80,0 | 0,5 | 20,0 | 15,3 | 0,71 | 0,12 |
| RMP N 250X | 80,0 | 1,1 | 20,0 | 15,2 | 1,26 | 0,12 |
| RMP N 250X | 80,0 | 1,5 | 20,0 | 15,1 | 1,59 | 0,12 |
| RMP N 250X | 80,0 | 2,1 | 20,0 | 14,9 | 2,21 | 0,12 |
| RMP N 250X | 80,0 | 2,2 | 20,0 | 14,9 | 2,42 | 0,12 |
| RMP N 250X | 80,0 | 2,3 | 20,0 | 14,8 | 2,79 | 0,13 |
| RMP N 250X | 80,0 | 2,4 | 20,0 | 14,8 | 3,28 | 0,13 |
| RMP N 250X | 80,0 | 2,5 | 20,0 | 14,8 | 3,83 | 0,13 |
| RMP N 250X | 80,0 | 2,6 | 20,0 | 14,7 | 5,79 | 0,14 |
| RMP N 250X | 90,0 | 0,5 | 18,0 | 13,4 | 1,20 | 0,13 |
| RMP N 250X | 90,0 | 0,9 | 18,0 | 13,3 | 1,67 | 0,13 |
| RMP N 250X | 90,0 | 1,6 | 18,0 | 13,4 | 2,25 | 0,13 |
| RMP N 250X | 90,0 | 1,8 | 18,0 | 13,3 | 2,74 | 0,14 |
| RMP N 250X | 90,0 | 2,0 | 18,0 | 13,2 | 3,02 | 0,14 |
| RMP N 250X | 90,0 | 2,1 | 18,0 | 13,2 | 3,41 | 0,14 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,u}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250X | 90,0 | 2,1 | 18,0 | 13,2 | 3,75 | 0,14 |
| RMP N 250X | 90,0 | 2,3 | 18,0 | 13,3 | 4,35 | 0,15 |
| RMP N 250X | 90,0 | 2,4 | 18,0 | 13,3 | 5,03 | 0,15 |
| RMP N 250X | 90,0 | 2,5 | 18,0 | 13,3 | 6,24 | 0,16 |
| RMP N 250X | 90,0 | 2,5 | 18,0 | 13,3 | 7,70 | 0,16 |
| RMP N 250X | 100,0 | 0,5 | 18,0 | 13,8 | 1,55 | 0,13 |
| RMP N 250X | 100,0 | 1,0 | 18,0 | 13,8 | 2,14 | 0,14 |
| RMP N 250X | 100,0 | 1,5 | 18,0 | 13,7 | 2,91 | 0,14 |
| RMP N 250X | 100,0 | 2,0 | 18,0 | 13,6 | 4,70 | 0,15 |
| RMP N 250Y | - | 0,6 | 20,0 | 17,9 | 0,10 | - |
| RMP N 250Y | - | 1,1 | 20,0 | 17,8 | 0,32 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,0 | 20,0 | 17,6 | 1,17 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,5 | 20,0 | 17,5 | 1,80 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,2 | 20,0 | 17,4 | 2,76 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,6 | 20,0 | 17,3 | 3,56 | - |
| RMP N 250Y | - | 4,1 | 20,0 | 17,3 | 4,78 | - |
| RMP N 250Y | 30,0 | 0,6 | 18,0 | 15,8 | 0,16 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 1,1 | 18,0 | 15,6 | 0,50 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 1,5 | 18,0 | 15,5 | 0,99 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,1 | 18,0 | 15,3 | 1,94 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,3 | 18,0 | 15,1 | 2,55 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,4 | 18,0 | 15,0 | 2,88 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,5 | 18,0 | 14,9 | 3,38 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,6 | 18,0 | 14,8 | 3,99 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,7 | 18,0 | 14,6 | 4,58 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,8 | 18,0 | 14,5 | 5,65 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 30,0 | 2,9 | 18,0 | 14,5 | 10,48 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 0,6 | 20,0 | 14,1 | 0,17 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 1,0 | 20,0 | 14,1 | 0,56 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 1,6 | 20,0 | 14,0 | 1,17 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,1 | 20,0 | 13,9 | 2,43 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,3 | 20,0 | 13,9 | 3,52 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,4 | 20,0 | 13,8 | 4,37 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,5 | 20,0 | 13,7 | 5,44 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,6 | 20,0 | 13,7 | 7,46 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,6 | 20,0 | 13,7 | 12,08 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 0,6 | 20,0 | 14,1 | 0,19 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 1,1 | 20,0 | 14,0 | 0,61 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 1,5 | 20,0 | 14,0 | 1,43 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,0 | 20,0 | 13,9 | 3,64 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,1 | 20,0 | 13,8 | 4,31 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,2 | 20,0 | 13,8 | 4,98 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,3 | 20,0 | 13,8 | 5,99 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,4 | 20,0 | 13,8 | 9,45 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,4 | 20,0 | 13,7 | 11,84 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 1,0 | 20,0 | 16,1 | 0,51 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 1,5 | 20,0 | 15,0 | 1,16 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,1 | 20,0 | 14,8 | 2,15 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,3 | 20,0 | 14,7 | 2,93 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,5 | 20,0 | 14,4 | 6,44 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,6 | 20,0 | 14,3 | 8,69 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 0,6 | 19,0 | 16,4 | 0,19 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 1,1 | 19,0 | 15,6 | 0,61 | 0,09 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,u}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250Y | 50,0 | 1,5 | 19,0 | 14,9 | 1,39 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 1,7 | 19,0 | 14,8 | 1,87 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 1,8 | 19,0 | 14,7 | 2,23 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 1,9 | 19,0 | 14,6 | 3,10 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,1 | 19,0 | 14,5 | 4,09 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,1 | 19,0 | 14,4 | 4,83 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,2 | 19,0 | 14,3 | 5,98 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 50,0 | 2,3 | 19,0 | 14,2 | 8,83 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 0,6 | 18,0 | 14,2 | 0,23 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,0 | 18,0 | 14,2 | 0,79 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,2 | 18,0 | 14,2 | 1,54 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,3 | 18,0 | 14,1 | 1,95 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,4 | 18,0 | 13,9 | 2,49 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,5 | 18,0 | 13,8 | 3,12 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,6 | 18,0 | 13,8 | 3,63 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,8 | 19,0 | 13,7 | 4,25 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 1,9 | 19,0 | 13,7 | 4,90 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 2,0 | 19,0 | 13,7 | 5,81 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 2,1 | 19,0 | 13,6 | 6,91 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 2,2 | 19,0 | 13,6 | 8,70 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 60,0 | 2,2 | 19,0 | 13,5 | 11,08 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 0,5 | 19,0 | 14,3 | 0,24 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 1,0 | 19,0 | 14,2 | 1,11 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 1,4 | 19,0 | 14,1 | 3,48 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 1,5 | 19,0 | 14,1 | 4,11 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 1,6 | 19,0 | 14,1 | 4,94 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 1,7 | 19,0 | 14,0 | 5,88 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 1,9 | 19,0 | 13,9 | 6,98 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 2,0 | 19,0 | 13,6 | 9,28 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 70,0 | 2,0 | 19,0 | 13,3 | 11,94 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 0,5 | 19,0 | 14,6 | 0,26 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,0 | 19,0 | 14,4 | 2,25 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,2 | 19,0 | 14,2 | 3,26 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,3 | 19,0 | 14,2 | 3,61 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,3 | 19,0 | 14,1 | 4,27 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,4 | 19,0 | 14,1 | 5,08 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,5 | 19,0 | 14,0 | 6,01 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,7 | 19,0 | 13,9 | 7,18 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,8 | 19,0 | 13,8 | 8,84 | 0,14 |
| RMP N 250Y | 80,0 | 1,8 | 19,0 | 13,8 | 12,19 | 0,16 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 0,6 | 19,0 | 14,2 | 0,40 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 0,8 | 19,0 | 14,1 | 2,01 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,0 | 19,0 | 14,1 | 3,52 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,1 | 19,0 | 14,0 | 4,23 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,2 | 19,0 | 14,0 | 4,92 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,3 | 19,0 | 14,0 | 5,81 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,5 | 19,0 | 14,0 | 6,69 | 0,14 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,6 | 19,0 | 13,9 | 8,00 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,7 | 19,0 | 13,9 | 9,69 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 90,0 | 1,7 | 19,0 | 13,9 | 12,49 | 0,17 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 0,5 | 19,0 | 15,1 | 1,19 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 0,8 | 19,0 | 15,1 | 3,34 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 0,9 | 19,0 | 15,0 | 4,07 | 0,14 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,u}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250Y | 100,0 | 1,0 | 19,0 | 15,0 | 4,80 | 0,14 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 1,1 | 19,0 | 14,9 | 5,67 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 1,2 | 20,0 | 14,8 | 6,78 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 1,3 | 20,0 | 14,7 | 7,96 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 1,4 | 20,0 | 14,6 | 9,84 | 0,16 |
| RMP N 250Y | 100,0 | 1,5 | 20,0 | 14,6 | 11,01 | 0,17 |
| RMP SP 250 | - | 0,6 | 19,0 | 18,2 | 0,05 | - |
| RMP SP 250 | - | 1,0 | 19,0 | 18,0 | 0,18 | - |
| RMP SP 250 | - | 1,6 | 19,0 | 17,6 | 0,41 | - |
| RMP SP 250 | - | 2,0 | 19,0 | 17,2 | 0,68 | - |
| RMP SP 250 | - | 2,6 | 19,0 | 17,1 | 1,06 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,1 | 19,0 | 17,0 | 1,54 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,5 | 19,0 | 16,9 | 2,02 | - |
| RMP SP 250 | - | 4,1 | 18,0 | 16,8 | 2,64 | - |
| RMP SP 250 | - | 4,6 | 18,0 | 16,8 | 3,35 | - |
| RMP SP 250 | - | 5,1 | 18,0 | 16,8 | 4,16 | - |
| RMP SP 250 | 10,0 | 0,6 | 19,0 | 15,3 | 0,07 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 1,0 | 19,0 | 15,3 | 0,20 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 2,1 | 19,0 | 15,3 | 0,81 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 2,5 | 19,0 | 15,3 | 1,25 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 3,1 | 19,0 | 15,3 | 1,83 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 3,6 | 19,0 | 14,9 | 2,55 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 3,8 | 19,0 | 14,9 | 3,02 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 4,0 | 19,0 | 14,9 | 3,50 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 4,2 | 19,0 | 14,6 | 4,01 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 4,4 | 19,0 | 14,5 | 4,69 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 4,6 | 19,0 | 14,4 | 5,55 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 4,8 | 19,0 | 14,4 | 7,21 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 10,0 | 4,9 | 19,0 | 14,4 | 12,57 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 0,6 | 19,0 | 14,4 | 0,08 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 1,0 | 19,0 | 14,4 | 0,24 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 2,1 | 19,0 | 14,3 | 0,88 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 3,1 | 19,0 | 14,3 | 2,10 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 3,6 | 19,0 | 14,2 | 3,22 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 3,8 | 19,0 | 14,2 | 3,88 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 4,0 | 19,0 | 14,2 | 4,63 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 4,2 | 19,0 | 14,2 | 6,46 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 4,3 | 19,0 | 14,2 | 8,09 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 4,4 | 19,0 | 14,1 | 9,63 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 20,0 | 4,5 | 19,0 | 14,1 | 13,54 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 0,6 | 17,0 | 16,5 | 0,11 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 1,0 | 17,0 | 16,3 | 0,26 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 2,0 | 17,0 | 15,5 | 0,99 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 2,9 | 17,0 | 15,3 | 1,96 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 3,3 | 17,0 | 15,1 | 2,69 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 3,6 | 17,0 | 15,0 | 3,91 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 3,8 | 17,0 | 14,9 | 5,10 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 4,0 | 17,0 | 14,8 | 9,83 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 4,0 | 17,0 | 14,7 | 14,36 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 30,0 | 4,1 | 17,0 | 14,7 | 21,29 | 0,18 |
| RMP SP 250 | 40,0 | 0,6 | 17,0 | 14,8 | 0,10 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 40,0 | 1,0 | 17,0 | 14,7 | 0,29 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 40,0 | 2,0 | 16,0 | 14,7 | 1,08 | 0,08 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,u}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP SP 250 | 40,0 | 2,6 | 16,0 | 14,6 | 1,70 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 40,0 | 3,1 | 16,0 | 14,6 | 2,71 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 40,0 | 3,3 | 16,0 | 14,4 | 4,00 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 40,0 | 3,6 | 16,0 | 14,3 | 9,73 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 40,0 | 3,6 | 16,0 | 14,3 | 17,76 | 0,16 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,7 | 16,0 | 14,3 | 0,13 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 1,0 | 16,0 | 14,2 | 0,29 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 2,0 | 16,0 | 14,2 | 1,15 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 2,6 | 16,0 | 14,2 | 1,86 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 3,1 | 16,0 | 14,1 | 5,29 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 3,2 | 16,0 | 14,0 | 8,64 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 3,2 | 16,0 | 14,0 | 13,95 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 3,2 | 16,0 | 13,9 | 21,63 | 0,20 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 14,0 | 0,10 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,9 | 0,31 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,9 | 1,14 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,9 | 1,86 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,9 | 2,56 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,9 | 4,23 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,9 | 6,14 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,8 | 9,15 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 50,0 | 0,0 | 18,0 | 13,8 | 15,90 | 0,16 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 0,6 | 16,0 | 14,7 | 0,11 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 1,1 | 16,0 | 14,6 | 0,37 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,1 | 16,0 | 14,5 | 1,37 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,4 | 16,0 | 14,5 | 1,91 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,5 | 16,0 | 14,5 | 2,46 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,6 | 16,0 | 14,6 | 3,44 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,7 | 16,0 | 14,6 | 4,33 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,8 | 17,0 | 14,6 | 6,95 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,9 | 17,0 | 14,6 | 9,80 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 60,0 | 2,9 | 17,0 | 14,6 | 15,52 | 0,16 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 0,6 | 17,0 | 15,1 | 0,12 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 1,1 | 17,0 | 15,1 | 0,39 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 1,9 | 17,0 | 15,1 | 1,50 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 2,0 | 17,0 | 15,1 | 1,89 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 2,2 | 17,0 | 15,1 | 2,35 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 2,2 | 17,0 | 15,0 | 2,80 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 2,4 | 17,0 | 14,9 | 3,96 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 2,4 | 17,0 | 14,9 | 5,69 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 2,6 | 17,0 | 14,9 | 8,00 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 70,0 | 2,7 | 17,0 | 14,7 | 14,52 | 0,18 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 0,6 | 17,0 | 14,7 | 0,14 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 1,0 | 17,0 | 14,7 | 0,40 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 1,5 | 17,0 | 14,7 | 1,22 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 1,8 | 17,0 | 14,6 | 2,33 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 1,9 | 17,0 | 14,5 | 3,00 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 2,0 | 17,0 | 14,5 | 3,79 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 2,1 | 17,0 | 14,5 | 4,84 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 2,3 | 17,0 | 14,4 | 6,48 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 2,3 | 18,0 | 14,3 | 9,65 | 0,16 |
| RMP SP 250 | 80,0 | 2,4 | 18,0 | 14,3 | 15,71 | 0,20 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 0,6 | 18,0 | 14,4 | 0,17 | 0,12 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L $m^3/(m^2 \cdot h)$ | F $Pa^{1/2}$ | T_L $^{\circ}C$ | $T_{G,u}$ $^{\circ}C$ | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m^3/m^3 |
|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,0 | 18,0 | 14,2 | 0,69 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,3 | 18,0 | 14,2 | 1,67 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,4 | 18,0 | 14,2 | 2,02 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,5 | 18,0 | 14,2 | 2,45 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,6 | 18,0 | 14,2 | 2,91 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,7 | 18,0 | 14,2 | 3,48 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,8 | 18,0 | 14,2 | 4,18 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 1,9 | 18,0 | 14,2 | 5,09 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 2,0 | 18,0 | 14,2 | 6,82 | 0,15 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 2,2 | 18,0 | 14,2 | 9,24 | 0,16 |
| RMP SP 250 | 90,0 | 2,2 | 18,0 | 14,2 | 13,06 | 0,18 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 0,6 | 18,0 | 14,1 | 0,22 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 1,0 | 18,0 | 14,1 | 1,48 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 1,3 | 18,0 | 14,1 | 2,64 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 1,5 | 18,0 | 14,1 | 3,48 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 1,7 | 18,0 | 14,1 | 5,33 | 0,15 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 1,8 | 18,0 | 14,0 | 6,56 | 0,15 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 1,9 | 18,0 | 14,0 | 8,96 | 0,16 |
| RMP SP 250 | 100,0 | 2,0 | 18,0 | 14,0 | 17,34 | 0,19 |
| RSP 250Y | - | 0,6 | 29,0 | 25,5 | 0,11 | - |
| RSP 250Y | - | 1,0 | 29,0 | 25,3 | 0,30 | - |
| RSP 250Y | - | 1,6 | 29,0 | 25,2 | 0,68 | - |
| RSP 250Y | - | 2,0 | 29,0 | 25,1 | 1,09 | - |
| RSP 250Y | - | 2,5 | 29,0 | 25,0 | 1,65 | - |
| RSP 250Y | - | 3,0 | 29,0 | 25,0 | 2,32 | - |
| RSP 250Y | - | 3,6 | 29,0 | 24,9 | 3,12 | - |
| RSP 250Y | 10,0 | 0,6 | 29,0 | 24,1 | 0,14 | 0,04 |
| RSP 250Y | 10,0 | 1,0 | 29,0 | 24,0 | 0,38 | 0,04 |
| RSP 250Y | 10,0 | 2,1 | 29,0 | 23,9 | 1,34 | 0,05 |
| RSP 250Y | 10,0 | 2,6 | 29,0 | 23,7 | 2,05 | 0,05 |
| RSP 250Y | 10,0 | 2,9 | 29,0 | 23,2 | 2,60 | 0,05 |
| RSP 250Y | 10,0 | 3,2 | 29,0 | 23,1 | 3,48 | 0,05 |
| RSP 250Y | 10,0 | 3,4 | 29,0 | 23,0 | 4,17 | 0,05 |
| RSP 250Y | 10,0 | 3,6 | 29,0 | 22,9 | 4,91 | 0,06 |
| RSP 250Y | 10,0 | 3,8 | 29,0 | 22,7 | 6,09 | 0,06 |
| RSP 250Y | 10,0 | 4,0 | 29,0 | 22,5 | 7,53 | 0,07 |
| RSP 250Y | 10,0 | 4,2 | 29,0 | 22,4 | 9,30 | 0,07 |
| RSP 250Y | 10,0 | 4,3 | 29,0 | 22,4 | 10,48 | 0,08 |
| RSP 250Y | 20,0 | 0,6 | 29,0 | 22,9 | 0,16 | 0,05 |
| RSP 250Y | 20,0 | 1,0 | 29,0 | 22,8 | 0,42 | 0,05 |
| RSP 250Y | 20,0 | 2,1 | 29,0 | 22,7 | 1,48 | 0,05 |
| RSP 250Y | 20,0 | 2,6 | 29,0 | 22,5 | 2,34 | 0,05 |
| RSP 250Y | 20,0 | 2,9 | 29,0 | 22,5 | 2,98 | 0,06 |
| RSP 250Y | 20,0 | 3,1 | 29,0 | 22,4 | 3,81 | 0,06 |
| RSP 250Y | 20,0 | 3,3 | 29,0 | 22,3 | 4,69 | 0,06 |
| RSP 250Y | 20,0 | 3,4 | 29,0 | 22,3 | 6,16 | 0,07 |
| RSP 250Y | 20,0 | 3,7 | 29,0 | 22,3 | 10,52 | 0,09 |
| RSP 250Y | 20,0 | 3,7 | 29,0 | 22,2 | 12,59 | 0,10 |
| RSP 250Y | 30,0 | 0,6 | 30,0 | 26,2 | 0,19 | 0,06 |
| RSP 250Y | 30,0 | 1,0 | 30,0 | 26,0 | 0,46 | 0,06 |
| RSP 250Y | 30,0 | 1,5 | 30,0 | 25,7 | 0,96 | 0,06 |
| RSP 250Y | 30,0 | 2,0 | 30,0 | 25,2 | 1,65 | 0,06 |
| RSP 250Y | 30,0 | 2,5 | 30,0 | 25,0 | 2,60 | 0,06 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L $m^3/(m^2 \cdot h)$ | F $Pa^{1/2}$ | T_L $^{\circ}C$ | $T_{G,u}$ $^{\circ}C$ | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m^3/m^3 |
|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| RSP 250Y | 30,0 | 2,7 | 30,0 | 24,6 | 3,07 | 0,07 |
| RSP 250Y | 30,0 | 2,8 | 30,0 | 24,1 | 3,58 | 0,07 |
| RSP 250Y | 30,0 | 2,9 | 30,0 | 24,1 | 4,27 | 0,07 |
| RSP 250Y | 30,0 | 3,0 | 30,0 | 24,0 | 4,93 | 0,07 |
| RSP 250Y | 30,0 | 3,1 | 30,0 | 23,9 | 5,71 | 0,08 |
| RSP 250Y | 30,0 | 3,2 | 30,0 | 23,7 | 6,78 | 0,08 |
| RSP 250Y | 30,0 | 3,2 | 30,0 | 22,8 | 11,39 | 0,11 |
| RSP 250Y | 40,0 | 0,6 | 30,0 | 23,7 | 0,22 | 0,07 |
| RSP 250Y | 40,0 | 1,0 | 29,0 | 23,5 | 0,51 | 0,07 |
| RSP 250Y | 40,0 | 1,5 | 29,0 | 23,4 | 1,11 | 0,07 |
| RSP 250Y | 40,0 | 2,1 | 29,0 | 23,1 | 1,95 | 0,07 |
| RSP 250Y | 40,0 | 2,5 | 29,0 | 23,1 | 2,92 | 0,08 |
| RSP 250Y | 40,0 | 2,6 | 29,0 | 23,0 | 3,38 | 0,08 |
| RSP 250Y | 40,0 | 2,7 | 29,0 | 22,8 | 3,83 | 0,08 |
| RSP 250Y | 40,0 | 2,8 | 29,0 | 22,5 | 4,41 | 0,08 |
| RSP 250Y | 40,0 | 2,9 | 29,0 | 22,1 | 5,65 | 0,09 |
| RSP 250Y | 40,0 | 2,9 | 29,0 | 22,7 | 11,93 | 0,12 |
| RSP 250Y | 50,0 | 0,6 | 29,0 | 22,2 | 0,25 | 0,08 |
| RSP 250Y | 50,0 | 1,0 | 29,0 | 22,1 | 0,61 | 0,08 |
| RSP 250Y | 50,0 | 1,5 | 29,0 | 22,0 | 1,35 | 0,09 |
| RSP 250Y | 50,0 | 2,1 | 29,0 | 21,8 | 2,52 | 0,09 |
| RSP 250Y | 50,0 | 2,4 | 29,0 | 21,7 | 3,63 | 0,10 |
| RSP 250Y | 50,0 | 2,5 | 29,0 | 21,7 | 4,19 | 0,10 |
| RSP 250Y | 50,0 | 2,5 | 29,0 | 21,7 | 4,98 | 0,10 |
| RSP 250Y | 50,0 | 2,7 | 29,0 | 21,5 | 9,38 | 0,12 |
| RSP 250Y | 50,0 | 2,7 | 29,0 | 21,5 | 12,27 | 0,14 |
| RSP 250Y | 60,0 | 0,6 | 29,0 | 26,0 | 0,26 | 0,09 |
| RSP 250Y | 60,0 | 1,0 | 29,0 | 25,9 | 0,72 | 0,09 |
| RSP 250Y | 60,0 | 1,5 | 29,0 | 25,6 | 1,65 | 0,10 |
| RSP 250Y | 60,0 | 1,9 | 29,0 | 25,4 | 2,85 | 0,10 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,0 | 29,0 | 25,4 | 3,24 | 0,10 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,1 | 29,0 | 25,3 | 3,76 | 0,10 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,3 | 29,0 | 24,9 | 4,42 | 0,11 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,3 | 29,0 | 24,8 | 4,97 | 0,12 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,3 | 29,0 | 24,3 | 5,59 | 0,13 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,4 | 29,0 | 23,9 | 6,63 | 0,13 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,5 | 29,0 | 23,6 | 8,75 | 0,13 |
| RSP 250Y | 60,0 | 2,5 | 29,0 | 23,4 | 12,57 | 0,15 |
| RSP 250Y | 70,0 | 0,6 | 29,0 | 23,2 | 0,32 | 0,10 |
| RSP 250Y | 70,0 | 1,0 | 29,0 | 23,2 | 0,88 | 0,10 |
| RSP 250Y | 70,0 | 1,5 | 29,0 | 23,2 | 2,33 | 0,11 |
| RSP 250Y | 70,0 | 1,8 | 29,0 | 23,1 | 3,78 | 0,12 |
| RSP 250Y | 70,0 | 1,9 | 29,0 | 23,1 | 4,40 | 0,12 |
| RSP 250Y | 70,0 | 2,1 | 29,0 | 22,9 | 5,17 | 0,12 |
| RSP 250Y | 70,0 | 2,1 | 29,0 | 22,9 | 8,45 | 0,13 |
| RSP 250Y | 70,0 | 2,2 | 29,0 | 22,8 | 12,61 | 0,16 |
| RSP 250Y | 80,0 | 0,6 | 29,0 | 22,7 | 0,36 | 0,10 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,0 | 29,0 | 22,7 | 1,07 | 0,11 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,5 | 29,0 | 23,0 | 3,32 | 0,12 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,7 | 29,0 | 22,9 | 4,68 | 0,13 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,8 | 29,0 | 22,8 | 6,37 | 0,13 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,8 | 29,0 | 22,8 | 8,29 | 0,14 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,9 | 29,0 | 22,8 | 12,25 | 0,17 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | F $\text{Pa}^{1/2}$ | T_L $^{\circ}\text{C}$ | $T_{G,u}$ $^{\circ}\text{C}$ | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m^3/m^3 |
|--------------------------|---|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| RSP 250Y | 90,0 | 0,6 | 29,0 | 22,8 | 0,48 | 0,11 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,0 | 29,0 | 22,8 | 1,40 | 0,12 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,1 | 29,0 | 22,9 | 1,83 | 0,12 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,2 | 29,0 | 22,9 | 2,48 | 0,12 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,3 | 29,0 | 22,9 | 3,07 | 0,13 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,4 | 29,0 | 23,0 | 3,74 | 0,13 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,5 | 29,0 | 23,1 | 4,60 | 0,13 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,6 | 29,0 | 23,1 | 8,81 | 0,16 |
| RSP 250Y | 90,0 | 1,6 | 29,0 | 23,1 | 11,81 | 0,17 |
| RSP 250Y | 100,0 | 0,5 | 29,0 | 23,0 | 0,50 | 0,12 |
| RSP 250Y | 100,0 | 1,0 | 29,0 | 23,1 | 2,05 | 0,13 |
| RSP 250Y | 100,0 | 1,1 | 29,0 | 23,1 | 3,14 | 0,13 |
| RSP 250Y | 100,0 | 1,2 | 29,0 | 23,1 | 3,86 | 0,14 |
| RSP 250Y | 100,0 | 1,3 | 29,0 | 23,0 | 4,72 | 0,14 |
| RSP 250Y | 100,0 | 1,4 | 29,0 | 23,0 | 6,50 | 0,15 |
| RSP 250Y | 100,0 | 1,4 | 29,0 | 23,0 | 8,07 | 0,16 |

Tabelle 13: Versuchsdaten zu fluiddynamischen Eigenschaften am Versuchsstand V-150.

| Packung | u_L $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | F $\text{Pa}^{1/2}$ | T_L $^{\circ}\text{C}$ | $T_{G,o}$ $^{\circ}\text{C}$ | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m^3/m^3 |
|------------|---|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| RMP N 250X | - | 0,5 | 14,3 | 17,0 | 0,03 | - |
| RMP N 250X | - | 1,0 | 14,3 | 16,4 | 0,13 | - |
| RMP N 250X | - | 1,5 | 14,3 | 15,8 | 0,29 | - |
| RMP N 250X | - | 2,5 | 14,5 | 14,9 | 0,81 | - |
| RMP N 250X | - | 2,0 | 14,5 | 14,7 | 0,52 | - |
| RMP N 250X | - | 2,5 | 14,5 | 14,3 | 0,81 | - |
| RMP N 250X | - | 3,2 | 14,5 | 13,9 | 1,30 | - |
| RMP N 250X | - | 3,4 | 14,4 | 13,6 | 1,44 | - |
| RMP N 250X | - | 3,6 | 14,4 | 13,4 | 1,65 | - |
| RMP N 250X | - | 3,7 | 14,4 | 13,3 | 1,72 | - |
| RMP N 250X | - | 3,8 | 14,3 | 13,1 | 1,77 | - |
| RMP N 250X | - | 3,9 | 14,3 | 13,1 | 1,85 | - |
| RMP N 250X | - | 4,1 | 14,2 | 12,9 | 2,11 | - |
| RMP N 250X | - | 4,2 | 14,1 | 12,8 | 2,20 | - |
| RMP N 250X | 19,1 | 0,5 | 17,7 | 18,5 | 0,06 | 0,04 |
| RMP N 250X | 19,0 | 1,0 | 17,7 | 18,3 | 0,17 | 0,04 |
| RMP N 250X | 19,1 | 1,5 | 17,6 | 18,1 | 0,37 | 0,04 |
| RMP N 250X | 19,3 | 2,6 | 17,2 | 17,6 | 1,24 | 0,04 |
| RMP N 250X | 19,3 | 2,7 | 16,9 | 17,3 | 1,33 | 0,05 |
| RMP N 250X | 19,3 | 2,9 | 16,5 | 16,9 | 1,54 | 0,05 |
| RMP N 250X | 19,3 | 3,0 | 16,1 | 16,6 | 1,66 | 0,05 |
| RMP N 250X | 19,3 | 3,1 | 15,7 | 16,2 | 1,78 | 0,05 |
| RMP N 250X | 19,3 | 3,2 | 15,4 | 15,9 | 1,90 | 0,06 |
| RMP N 250X | 19,3 | 3,3 | 15,1 | 15,6 | 2,03 | 0,06 |
| RMP N 250X | 19,3 | 3,4 | 14,8 | 15,3 | 2,18 | 0,06 |
| RMP N 250X | 19,5 | 3,6 | 14,3 | 14,9 | 3,54 | 0,07 |
| RMP N 250X | 20,1 | 4,0 | 13,6 | 14,2 | 9,31 | 0,11 |
| RMP N 250X | 39,7 | 0,5 | 14,0 | 16,0 | 0,07 | 0,06 |
| RMP N 250X | 39,7 | 1,0 | 14,2 | 15,4 | 0,22 | 0,06 |
| RMP N 250X | 39,7 | 1,5 | 14,3 | 15,2 | 0,48 | 0,06 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,0}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250X | 39,8 | 2,6 | 14,4 | 15,0 | 1,62 | 0,07 |
| RMP N 250X | 39,7 | 2,7 | 14,3 | 14,9 | 1,79 | 0,07 |
| RMP N 250X | 39,7 | 2,9 | 14,2 | 14,8 | 2,30 | 0,07 |
| RMP N 250X | 39,9 | 3,2 | 14,0 | 14,6 | 5,11 | 0,09 |
| RMP N 250X | 40,3 | 3,4 | 13,6 | 14,2 | 17,73 | 0,18 |
| RMP N 250X | 59,4 | 0,5 | 14,4 | 16,1 | 0,07 | 0,08 |
| RMP N 250X | 59,4 | 1,0 | 14,6 | 15,7 | 0,28 | 0,08 |
| RMP N 250X | 59,3 | 1,5 | 14,8 | 15,5 | 0,65 | 0,08 |
| RMP N 250X | 59,2 | 2,0 | 14,9 | 15,5 | 1,24 | 0,08 |
| RMP N 250X | 59,0 | 2,1 | 14,9 | 15,4 | 1,34 | 0,08 |
| RMP N 250X | 58,9 | 2,2 | 14,9 | 15,4 | 1,59 | 0,08 |
| RMP N 250X | 59,0 | 2,3 | 14,9 | 15,4 | 1,80 | 0,09 |
| RMP N 250X | 58,9 | 2,4 | 14,8 | 15,3 | 2,15 | 0,09 |
| RMP N 250X | 58,9 | 2,5 | 14,7 | 15,2 | 3,04 | 0,09 |
| RMP N 250X | 58,9 | 2,6 | 14,6 | 15,1 | 4,33 | 0,10 |
| RMP N 250X | 58,9 | 2,7 | 14,5 | 15,0 | 5,32 | 0,10 |
| RMP N 250X | 58,9 | 2,8 | 14,4 | 14,9 | 6,53 | 0,11 |
| RMP N 250X | 80,0 | 0,5 | 18,0 | 18,7 | 0,13 | 0,09 |
| RMP N 250X | 79,6 | 1,0 | 18,1 | 18,6 | 0,76 | 0,09 |
| RMP N 250X | 79,5 | 1,5 | 18,2 | 18,5 | 1,39 | 0,09 |
| RMP N 250X | 79,4 | 1,6 | 18,2 | 18,4 | 1,52 | 0,10 |
| RMP N 250X | 79,3 | 1,7 | 18,2 | 18,4 | 1,73 | 0,10 |
| RMP N 250X | 79,2 | 1,8 | 18,1 | 18,4 | 1,96 | 0,10 |
| RMP N 250X | 79,1 | 1,9 | 18,0 | 18,3 | 2,38 | 0,10 |
| RMP N 250X | 79,0 | 2,0 | 17,9 | 18,2 | 2,64 | 0,10 |
| RMP N 250X | 78,6 | 2,1 | 17,7 | 18,0 | 3,02 | 0,11 |
| RMP N 250X | 78,6 | 2,2 | 17,5 | 17,9 | 4,13 | 0,11 |
| RMP N 250X | 78,5 | 2,3 | 17,3 | 17,7 | 5,25 | 0,12 |
| RMP N 250X | 78,5 | 2,4 | 17,1 | 17,5 | 6,53 | 0,13 |
| RMP N 250X | 78,3 | 2,5 | 16,9 | 17,3 | 7,79 | 0,14 |
| RMP N 250Y | - | 0,5 | 21,7 | 22,9 | 0,12 | - |
| RMP N 250Y | - | 1,0 | 21,9 | 22,7 | 0,31 | - |
| RMP N 250Y | - | 1,5 | 21,9 | 22,6 | 0,64 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,0 | 22,0 | 22,5 | 1,13 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,1 | 22,0 | 22,5 | 1,24 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,2 | 22,0 | 22,5 | 1,36 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,3 | 22,1 | 22,5 | 1,55 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,4 | 22,1 | 22,5 | 1,64 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,5 | 22,1 | 22,5 | 1,76 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,6 | 22,1 | 22,5 | 1,90 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,7 | 22,2 | 22,5 | 2,13 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,8 | 22,2 | 22,5 | 2,30 | - |
| RMP N 250Y | - | 2,9 | 22,2 | 22,5 | 2,44 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,0 | 22,2 | 22,5 | 2,53 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,1 | 22,2 | 22,6 | 2,76 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,2 | 22,3 | 22,5 | 3,00 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,3 | 22,3 | 22,6 | 3,22 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,4 | 22,3 | 22,6 | 3,40 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,5 | 22,3 | 22,6 | 3,55 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,6 | 22,4 | 22,6 | 3,77 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,7 | 21,7 | 22,6 | 4,05 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,8 | 22,4 | 22,6 | 4,29 | - |
| RMP N 250Y | - | 3,9 | 22,5 | 22,7 | 4,51 | - |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,o}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250Y | - | 4,0 | 22,3 | 22,7 | 4,76 | - |
| RMP N 250Y | - | 4,1 | 22,6 | 22,7 | 5,02 | - |
| RMP N 250Y | - | 4,2 | 22,6 | 22,7 | 5,33 | - |
| RMP N 250Y | 19,0 | 0,5 | 18,9 | 19,7 | 0,18 | 0,04 |
| RMP N 250Y | 19,0 | 0,7 | 19,0 | 19,6 | 0,28 | 0,04 |
| RMP N 250Y | 19,0 | 1,0 | 19,1 | 19,4 | 0,43 | 0,04 |
| RMP N 250Y | 19,1 | 1,2 | 19,1 | 19,4 | 0,55 | 0,04 |
| RMP N 250Y | 19,1 | 1,5 | 19,1 | 19,4 | 0,91 | 0,04 |
| RMP N 250Y | 19,2 | 1,7 | 19,1 | 19,4 | 1,20 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 19,2 | 1,9 | 19,0 | 19,3 | 1,57 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 19,2 | 2,0 | 18,9 | 19,2 | 1,70 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 19,3 | 2,1 | 18,8 | 19,1 | 1,86 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 19,3 | 2,2 | 18,6 | 18,9 | 2,13 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 19,3 | 2,3 | 18,3 | 18,7 | 2,38 | 0,05 |
| RMP N 250Y | 19,3 | 2,4 | 17,9 | 18,3 | 2,59 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 19,4 | 2,5 | 17,6 | 18,1 | 2,83 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 19,4 | 2,6 | 17,4 | 17,8 | 3,09 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 19,5 | 2,7 | 17,0 | 17,5 | 3,55 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 19,5 | 2,8 | 16,8 | 17,3 | 3,84 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 19,6 | 2,9 | 16,5 | 17,1 | 4,29 | 0,06 |
| RMP N 250Y | 19,6 | 3,0 | 16,2 | 16,8 | 4,72 | 0,07 |
| RMP N 250Y | 19,7 | 3,1 | 15,9 | 16,5 | 5,71 | 0,07 |
| RMP N 250Y | 19,7 | 3,2 | 15,6 | 16,2 | 6,40 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 19,8 | 3,3 | 15,4 | 16,0 | 7,58 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 20,0 | 3,4 | 15,1 | 15,8 | 9,34 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 20,4 | 3,5 | 14,8 | 15,5 | 13,84 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 20,7 | 3,5 | 14,4 | 15,2 | 17,31 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 21,3 | 3,5 | 14,2 | 14,9 | 23,79 | 0,17 |
| RMP N 250Y | 39,7 | 0,5 | 17,1 | 19,0 | 0,13 | 0,07 |
| RMP N 250Y | 39,8 | 0,7 | 17,2 | 18,3 | 0,26 | 0,07 |
| RMP N 250Y | 39,8 | 1,0 | 17,3 | 18,1 | 0,52 | 0,07 |
| RMP N 250Y | 39,8 | 1,3 | 17,2 | 17,9 | 0,83 | 0,07 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 1,4 | 17,2 | 17,8 | 0,98 | 0,07 |
| RMP N 250Y | 39,8 | 1,5 | 17,1 | 17,7 | 1,14 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 39,8 | 1,6 | 17,0 | 17,6 | 1,33 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 1,7 | 17,0 | 17,5 | 1,53 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 1,8 | 16,9 | 17,4 | 1,72 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 1,9 | 16,7 | 17,2 | 2,08 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 2,1 | 16,5 | 17,0 | 2,29 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 2,1 | 16,3 | 16,8 | 2,47 | 0,08 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 2,2 | 16,0 | 16,5 | 2,87 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 2,3 | 15,8 | 16,4 | 3,40 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 2,3 | 15,8 | 16,3 | 3,43 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 2,4 | 15,6 | 16,2 | 4,76 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 39,9 | 2,5 | 15,3 | 15,9 | 6,84 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 40,0 | 2,6 | 15,1 | 15,7 | 9,56 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 40,1 | 2,6 | 14,9 | 15,6 | 13,97 | 0,14 |
| RMP N 250Y | 56,9 | 0,5 | 18,8 | 19,5 | 0,21 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 56,8 | 0,7 | 18,8 | 19,4 | 0,42 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 56,8 | 1,0 | 18,8 | 19,3 | 0,79 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 56,7 | 1,2 | 18,7 | 19,2 | 1,05 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 56,7 | 1,5 | 18,6 | 19,0 | 1,65 | 0,09 |
| RMP N 250Y | 56,6 | 1,7 | 18,5 | 18,9 | 2,39 | 0,10 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,o}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP N 250Y | 56,5 | 1,8 | 18,3 | 18,7 | 3,03 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 56,6 | 1,9 | 18,1 | 18,5 | 5,27 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 56,5 | 2,0 | 17,8 | 18,3 | 6,96 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 56,6 | 2,1 | 17,6 | 18,0 | 9,36 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 56,9 | 2,2 | 17,3 | 17,8 | 13,76 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 56,6 | 2,2 | 17,1 | 17,6 | 19,84 | 0,19 |
| RMP N 250Y | 56,6 | 2,2 | 16,9 | 17,4 | 22,47 | 0,21 |
| RMP N 250Y | 77,8 | 0,5 | 19,2 | 20,0 | 0,40 | 0,10 |
| RMP N 250Y | 77,3 | 0,7 | 19,4 | 19,8 | 0,85 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 77,1 | 0,8 | 19,4 | 19,8 | 1,16 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 76,9 | 0,9 | 19,5 | 19,8 | 1,32 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 76,8 | 1,0 | 19,5 | 19,8 | 1,71 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 76,7 | 1,1 | 19,5 | 19,8 | 2,12 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 76,4 | 1,2 | 19,5 | 19,8 | 2,37 | 0,11 |
| RMP N 250Y | 76,2 | 1,3 | 19,5 | 19,8 | 3,71 | 0,12 |
| RMP N 250Y | 76,1 | 1,4 | 19,4 | 19,7 | 4,99 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 76,0 | 1,5 | 19,3 | 19,6 | 6,64 | 0,13 |
| RMP N 250Y | 76,0 | 1,6 | 19,2 | 19,5 | 8,52 | 0,14 |
| RMP N 250Y | 76,0 | 1,7 | 19,0 | 19,4 | 10,74 | 0,15 |
| RMP N 250Y | 76,0 | 1,8 | 18,9 | 19,2 | 15,29 | 0,18 |
| RMP N 250Y | 76,1 | 1,8 | 18,7 | 19,1 | 20,06 | 0,20 |
| RMP SP 250 | - | 0,5 | 18,1 | 18,9 | 0,08 | - |
| RMP SP 250 | - | 1,0 | 18,1 | 18,5 | 0,19 | - |
| RMP SP 250 | - | 1,5 | 18,1 | 18,0 | 0,42 | - |
| RMP SP 250 | - | 2,0 | 18,2 | 17,5 | 0,76 | - |
| RMP SP 250 | - | 2,0 | 18,2 | 17,3 | 0,76 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,0 | 18,1 | 16,5 | 1,76 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,1 | 18,1 | 16,1 | 1,86 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,3 | 18,0 | 15,7 | 2,06 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,4 | 17,9 | 15,3 | 2,17 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,6 | 17,7 | 14,8 | 2,50 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,7 | 16,5 | 13,2 | 2,59 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,8 | 16,4 | 13,1 | 2,66 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,9 | 17,5 | 14,3 | 2,81 | - |
| RMP SP 250 | - | 3,9 | 15,9 | 12,6 | 2,85 | - |
| RMP SP 250 | - | 4,0 | 15,8 | 12,5 | 3,03 | - |
| RMP SP 250 | - | 4,1 | 15,7 | 12,4 | 3,19 | - |
| RMP SP 250 | - | 4,2 | 15,7 | 12,4 | 3,34 | - |
| RMP SP 250 | - | 4,3 | 15,6 | 12,3 | 3,51 | - |
| RMP SP 250 | - | 4,4 | 15,5 | 12,3 | 3,59 | - |
| RMP SP 250 | 19,5 | 0,5 | 19,6 | 20,4 | 0,06 | 0,04 |
| RMP SP 250 | 19,5 | 1,0 | 19,6 | 20,1 | 0,24 | 0,04 |
| RMP SP 250 | 19,6 | 1,5 | 19,4 | 19,9 | 0,52 | 0,04 |
| RMP SP 250 | 19,7 | 2,0 | 19,2 | 19,5 | 0,95 | 0,04 |
| RMP SP 250 | 19,7 | 2,5 | 18,7 | 19,1 | 1,53 | 0,04 |
| RMP SP 250 | 19,8 | 2,6 | 18,4 | 18,8 | 1,72 | 0,05 |
| RMP SP 250 | 19,8 | 2,7 | 17,9 | 18,4 | 1,94 | 0,05 |
| RMP SP 250 | 19,9 | 2,8 | 17,5 | 18,0 | 2,11 | 0,05 |
| RMP SP 250 | 19,9 | 2,9 | 17,1 | 17,7 | 2,28 | 0,05 |
| RMP SP 250 | 19,9 | 3,0 | 16,8 | 17,3 | 2,44 | 0,05 |
| RMP SP 250 | 19,9 | 3,1 | 16,4 | 16,9 | 2,61 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 19,9 | 3,2 | 16,0 | 16,6 | 2,81 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 19,9 | 3,3 | 15,7 | 16,3 | 3,03 | 0,06 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,o}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RMP SP 250 | 20,0 | 3,4 | 15,4 | 16,0 | 3,22 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 20,1 | 3,6 | 15,0 | 15,6 | 4,27 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 20,1 | 3,7 | 14,7 | 15,3 | 4,74 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 20,2 | 3,8 | 14,4 | 15,1 | 5,25 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 20,2 | 3,9 | 14,2 | 14,8 | 6,39 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 20,7 | 4,0 | 13,8 | 14,4 | 10,64 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 38,7 | 0,5 | 14,4 | 16,6 | 0,06 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 38,7 | 1,0 | 14,6 | 15,8 | 0,28 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 1,5 | 14,7 | 15,6 | 0,63 | 0,06 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 2,5 | 14,5 | 15,1 | 1,93 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 2,6 | 14,4 | 15,0 | 2,16 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 2,7 | 14,3 | 14,9 | 2,41 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 2,8 | 14,2 | 14,8 | 2,76 | 0,07 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 2,9 | 14,1 | 14,7 | 3,16 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 3,0 | 14,0 | 14,6 | 4,12 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 3,1 | 13,9 | 14,5 | 5,35 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 3,2 | 13,8 | 14,4 | 6,28 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 38,7 | 3,4 | 13,6 | 14,1 | 10,57 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 38,6 | 3,4 | 13,2 | 13,8 | 11,83 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 59,6 | 0,5 | 13,9 | 16,3 | 0,10 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 59,6 | 1,0 | 14,1 | 15,5 | 0,37 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 59,5 | 1,5 | 14,3 | 15,3 | 0,85 | 0,08 |
| RMP SP 250 | 59,4 | 2,0 | 14,5 | 15,2 | 1,58 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 59,3 | 2,1 | 14,5 | 15,2 | 1,71 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 59,2 | 2,1 | 14,6 | 15,2 | 1,74 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 59,1 | 2,2 | 14,6 | 15,2 | 1,96 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 59,0 | 2,3 | 14,6 | 15,2 | 2,21 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 59,0 | 2,3 | 14,6 | 15,2 | 2,26 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 58,9 | 2,6 | 14,5 | 15,1 | 5,82 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 58,8 | 2,7 | 14,4 | 15,0 | 7,89 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 79,2 | 0,5 | 15,9 | 16,9 | 0,18 | 0,09 |
| RMP SP 250 | 78,8 | 1,0 | 15,9 | 16,7 | 0,63 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 78,6 | 1,5 | 15,8 | 16,4 | 1,38 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 78,5 | 1,6 | 15,7 | 16,3 | 1,58 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 78,4 | 1,7 | 15,6 | 16,1 | 1,67 | 0,10 |
| RMP SP 250 | 78,2 | 1,8 | 15,4 | 16,0 | 1,80 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 78,1 | 1,9 | 15,3 | 15,8 | 2,08 | 0,11 |
| RMP SP 250 | 79,7 | 2,1 | 14,9 | 15,5 | 4,43 | 0,12 |
| RMP SP 250 | 79,6 | 2,2 | 14,8 | 15,3 | 5,05 | 0,13 |
| RMP SP 250 | 79,6 | 2,3 | 14,5 | 15,1 | 8,26 | 0,14 |
| RMP SP 250 | 79,2 | 2,4 | 13,6 | 14,2 | 12,03 | 0,17 |
| RMP SP 250 | 79,2 | 2,3 | 13,5 | 14,1 | 12,14 | 0,18 |
| RSP 250Y | - | 0,5 | 17,3 | 18,9 | 0,07 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 1,0 | 17,3 | 18,6 | 0,22 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 1,5 | 17,3 | 18,1 | 0,50 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 2,0 | 17,5 | 17,5 | 0,91 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 2,5 | 17,5 | 16,9 | 1,42 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 2,6 | 17,4 | 16,5 | 1,57 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 2,7 | 17,4 | 16,1 | 1,71 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 2,8 | 17,3 | 15,8 | 1,84 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 2,9 | 17,3 | 15,5 | 1,96 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,0 | 17,2 | 15,3 | 2,12 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,1 | 17,1 | 15,2 | 2,21 | 0,00 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L $m^3/(m^2 \cdot h)$ | F $Pa^{1/2}$ | T_L $^{\circ}C$ | $T_{G,o}$ $^{\circ}C$ | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m^3/m^3 |
|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| RSP 250Y | - | 3,2 | 17,1 | 15,0 | 2,33 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,3 | 17,0 | 14,9 | 2,43 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,4 | 16,9 | 14,8 | 2,56 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,5 | 16,8 | 14,7 | 2,77 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,6 | 16,7 | 14,5 | 2,93 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,7 | 16,6 | 14,4 | 3,06 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,8 | 16,5 | 14,4 | 3,14 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 3,9 | 16,4 | 14,3 | 3,28 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 4,0 | 16,2 | 14,2 | 3,55 | 0,00 |
| RSP 250Y | - | 4,1 | 16,1 | 14,2 | 3,77 | 0,00 |
| RSP 250Y | 23,2 | 0,5 | 16,1 | 18,0 | 0,08 | 0,05 |
| RSP 250Y | 23,2 | 1,0 | 16,2 | 17,3 | 0,34 | 0,05 |
| RSP 250Y | 23,3 | 1,5 | 16,2 | 17,0 | 0,71 | 0,05 |
| RSP 250Y | 23,3 | 2,0 | 16,1 | 16,8 | 1,31 | 0,05 |
| RSP 250Y | 23,3 | 2,1 | 16,0 | 16,7 | 1,41 | 0,06 |
| RSP 250Y | 23,4 | 2,2 | 15,9 | 16,5 | 1,63 | 0,06 |
| RSP 250Y | 23,4 | 2,3 | 15,7 | 16,4 | 1,81 | 0,06 |
| RSP 250Y | 23,4 | 2,4 | 15,6 | 16,2 | 2,00 | 0,06 |
| RSP 250Y | 23,4 | 2,5 | 15,4 | 16,1 | 2,17 | 0,06 |
| RSP 250Y | 23,4 | 2,6 | 15,3 | 15,9 | 2,44 | 0,06 |
| RSP 250Y | 23,5 | 2,7 | 15,0 | 15,7 | 2,74 | 0,07 |
| RSP 250Y | 23,5 | 2,8 | 14,9 | 15,5 | 3,01 | 0,07 |
| RSP 250Y | 23,5 | 2,9 | 14,7 | 15,3 | 3,89 | 0,07 |
| RSP 250Y | 23,6 | 3,0 | 14,5 | 15,1 | 4,91 | 0,08 |
| RSP 250Y | 23,7 | 3,1 | 14,3 | 14,9 | 5,54 | 0,09 |
| RSP 250Y | 23,7 | 3,2 | 14,1 | 14,8 | 6,00 | 0,09 |
| RSP 250Y | 23,6 | 3,3 | 14,0 | 14,6 | 6,60 | 0,09 |
| RSP 250Y | 23,7 | 3,4 | 13,8 | 14,5 | 7,34 | 0,10 |
| RSP 250Y | 23,8 | 3,5 | 13,7 | 14,3 | 9,88 | 0,11 |
| RSP 250Y | 24,2 | 3,5 | 13,6 | 14,2 | 16,54 | 0,15 |
| RSP 250Y | 39,3 | 0,5 | 17,3 | 18,9 | 0,10 | 0,07 |
| RSP 250Y | 39,3 | 1,0 | 17,4 | 18,4 | 0,38 | 0,07 |
| RSP 250Y | 39,3 | 1,5 | 17,3 | 18,1 | 0,83 | 0,07 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,0 | 17,2 | 17,8 | 1,61 | 0,07 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,1 | 17,1 | 17,7 | 1,75 | 0,08 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,2 | 16,9 | 17,5 | 2,04 | 0,08 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,3 | 16,7 | 17,3 | 2,30 | 0,08 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,4 | 16,5 | 17,1 | 2,57 | 0,08 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,5 | 16,3 | 16,9 | 2,79 | 0,08 |
| RSP 250Y | 39,2 | 2,6 | 16,0 | 16,6 | 3,21 | 0,09 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,7 | 15,8 | 16,4 | 4,11 | 0,09 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,8 | 15,5 | 16,1 | 5,95 | 0,10 |
| RSP 250Y | 39,3 | 2,9 | 15,2 | 15,8 | 7,79 | 0,11 |
| RSP 250Y | 39,6 | 3,0 | 14,7 | 15,4 | 15,27 | 0,16 |
| RSP 250Y | 59,6 | 0,5 | 19,5 | 20,0 | 0,23 | 0,08 |
| RSP 250Y | 59,4 | 1,0 | 19,5 | 20,0 | 0,46 | 0,08 |
| RSP 250Y | 59,4 | 1,5 | 19,5 | 19,9 | 1,08 | 0,09 |
| RSP 250Y | 59,3 | 2,0 | 19,3 | 19,6 | 2,31 | 0,09 |
| RSP 250Y | 59,3 | 2,1 | 19,1 | 19,5 | 2,63 | 0,10 |
| RSP 250Y | 59,2 | 2,2 | 18,8 | 19,2 | 3,07 | 0,10 |
| RSP 250Y | 59,3 | 2,3 | 18,5 | 18,9 | 3,85 | 0,11 |
| RSP 250Y | 59,3 | 2,4 | 18,2 | 18,6 | 4,88 | 0,11 |
| RSP 250Y | 59,3 | 2,5 | 17,9 | 18,3 | 6,61 | 0,12 |

| (fortgesetzt) Packung | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_L °C | $T_{G,o}$ °C | $\Delta p/Z$ hPa/m | h_L m ³ /m ³ |
|--------------------------|--|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---|
| RSP 250Y | 59,4 | 2,6 | 17,1 | 17,6 | 15,45 | 0,17 |
| RSP 250Y | 80,3 | 0,5 | 15,3 | 17,0 | 0,17 | 0,10 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,0 | 15,6 | 16,7 | 0,60 | 0,10 |
| RSP 250Y | 80,1 | 1,5 | 15,8 | 16,6 | 1,65 | 0,11 |
| RSP 250Y | 80,1 | 1,6 | 15,9 | 16,6 | 2,00 | 0,11 |
| RSP 250Y | 80,0 | 1,7 | 15,9 | 16,6 | 2,37 | 0,11 |
| RSP 250Y | 79,9 | 1,8 | 16,0 | 16,6 | 2,74 | 0,11 |
| RSP 250Y | 79,9 | 1,9 | 16,0 | 16,6 | 3,44 | 0,12 |
| RSP 250Y | 79,9 | 2,0 | 16,0 | 16,5 | 4,28 | 0,13 |
| RSP 250Y | 79,8 | 2,1 | 15,9 | 16,5 | 5,22 | 0,13 |
| RSP 250Y | 79,9 | 2,2 | 15,7 | 16,3 | 18,24 | 0,20 |

Anhang C: Versuchsdaten zu effektiven Phasengrenzflächen a_e

Tabelle 14: Versuchsdaten zu a_e am Versuchsstand V-422.

| Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_{sys} °C | c_{OH^-} mol/L | $c_{CO_3^{2-}}$ mol/L | $y_{CO_2,u}$ ppm | $y_{CO_2,o}$ ppm | $D_{CO_2,L}$ m ² /s | $H_{CO_2,L}$ bar·m ³ /kmol | $k_{OG}a_e$ 1/s | k_G' kmol/(m ² ·bar·s) | a_e m ² /m ³ | a_e/a_p |
|------------|----------|--|--------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|--|--------------------|--|---|-----------|
| RMP N 250X | 1,31 | 10,0 | 1,13 | 20,8 | 0,113 | 0,002 | 418,5 | 341,4 | 1,83E-09 | 27,3 | 0,161 | 4,27E-05 | 154,5 | 0,62 |
| RMP N 250X | 1,31 | 20,0 | 1,13 | 20,8 | 0,108 | 0,005 | 419,9 | 336,0 | 1,81E-09 | 27,3 | 0,177 | 4,16E-05 | 173,6 | 0,69 |
| RMP N 250X | 1,31 | 30,0 | 1,13 | 20,8 | 0,108 | 0,004 | 421,0 | 331,2 | 1,82E-09 | 27,3 | 0,190 | 4,17E-05 | 186,6 | 0,75 |
| RMP N 250X | 1,31 | 40,0 | 1,12 | 20,7 | 0,110 | 0,004 | 419,9 | 326,2 | 1,81E-09 | 27,2 | 0,199 | 4,20E-05 | 194,2 | 0,78 |
| RMP N 250X | 1,31 | 50,0 | 1,12 | 20,6 | 0,109 | 0,004 | 421,0 | 320,8 | 1,81E-09 | 27,1 | 0,215 | 4,18E-05 | 210,4 | 0,84 |
| RMP N 250X | 1,31 | 60,0 | 1,12 | 20,6 | 0,111 | 0,004 | 421,3 | 316,5 | 1,81E-09 | 27,1 | 0,226 | 4,20E-05 | 219,9 | 0,88 |
| RMP N 250X | 1,31 | 20,0 | 1,10 | 20,5 | 0,111 | 0,004 | 420,9 | 333,4 | 1,81E-09 | 27,1 | 0,192 | 4,21E-05 | 187,3 | 0,75 |
| RMP N 250X | 1,31 | 30,0 | 1,12 | 20,5 | 0,109 | 0,005 | 421,8 | 330,3 | 1,80E-09 | 27,0 | 0,193 | 4,15E-05 | 190,6 | 0,76 |
| RMP N 250X | 1,31 | 40,0 | 1,12 | 20,4 | 0,111 | 0,004 | 421,0 | 325,8 | 1,80E-09 | 27,0 | 0,202 | 4,19E-05 | 198,0 | 0,79 |
| RMP N 250X | 1,31 | 50,0 | 1,12 | 20,4 | 0,110 | 0,004 | 422,1 | 320,7 | 1,80E-09 | 27,0 | 0,216 | 4,17E-05 | 212,1 | 0,85 |
| RMP N 250X | 1,31 | 60,0 | 1,12 | 20,4 | 0,111 | 0,004 | 421,6 | 316,3 | 1,80E-09 | 27,0 | 0,226 | 4,20E-05 | 220,8 | 0,88 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 10,0 | 1,03 | 18,5 | 0,176 | 0,006 | 448,1 | 356,5 | 1,68E-09 | 26,1 | 0,137 | 5,05E-05 | 112,2 | 0,45 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 20,0 | 1,02 | 18,3 | 0,174 | 0,006 | 439,8 | 330,7 | 1,67E-09 | 25,9 | 0,169 | 5,00E-05 | 139,3 | 0,56 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 30,0 | 1,02 | 18,2 | 0,173 | 0,006 | 445,9 | 315,5 | 1,67E-09 | 25,9 | 0,204 | 4,99E-05 | 168,9 | 0,68 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 40,0 | 1,02 | 18,2 | 0,173 | 0,006 | 443,6 | 299,0 | 1,66E-09 | 25,9 | 0,233 | 4,99E-05 | 192,8 | 0,77 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 50,0 | 1,03 | 18,2 | 0,173 | 0,006 | 444,6 | 282,9 | 1,66E-09 | 25,9 | 0,270 | 4,98E-05 | 223,6 | 0,89 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 60,0 | 1,02 | 18,2 | 0,174 | 0,007 | 440,3 | 271,0 | 1,66E-09 | 25,9 | 0,288 | 4,99E-05 | 238,0 | 0,95 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 10,0 | 1,01 | 19,7 | 0,166 | 0,011 | 380,1 | 291,9 | 1,72E-09 | 27,0 | 0,156 | 4,97E-05 | 129,0 | 0,52 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 20,0 | 1,01 | 19,4 | 0,162 | 0,011 | 386,9 | 279,7 | 1,70E-09 | 26,7 | 0,192 | 4,90E-05 | 161,0 | 0,64 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 30,0 | 1,02 | 19,8 | 0,164 | 0,011 | 394,8 | 273,5 | 1,72E-09 | 27,1 | 0,218 | 4,96E-05 | 180,5 | 0,72 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 40,0 | 1,02 | 19,8 | 0,162 | 0,011 | 400,5 | 266,9 | 1,72E-09 | 27,1 | 0,242 | 4,94E-05 | 201,4 | 0,81 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 50,0 | 1,02 | 19,8 | 0,163 | 0,011 | 404,0 | 258,9 | 1,72E-09 | 27,1 | 0,265 | 4,95E-05 | 219,5 | 0,88 |
| RMP N 250Y | 1,58 | 60,0 | 1,02 | 19,8 | 0,164 | 0,012 | 408,9 | 254,2 | 1,72E-09 | 27,1 | 0,283 | 4,95E-05 | 234,9 | 0,94 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 10,0 | 0,97 | 19,0 | 0,187 | 0,002 | 428,2 | 339,2 | 1,72E-09 | 26,5 | 0,143 | 5,26E-05 | 111,7 | 0,45 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 20,0 | 1,02 | 18,7 | 0,185 | 0,002 | 431,0 | 320,1 | 1,70E-09 | 26,3 | 0,191 | 5,21E-05 | 151,3 | 0,61 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 30,0 | 1,02 | 18,7 | 0,184 | 0,003 | 436,8 | 310,1 | 1,70E-09 | 26,3 | 0,219 | 5,19E-05 | 174,1 | 0,70 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 40,0 | 1,02 | 18,6 | 0,183 | 0,003 | 440,2 | 298,4 | 1,69E-09 | 26,2 | 0,249 | 5,16E-05 | 198,6 | 0,79 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 50,0 | 1,01 | 18,5 | 0,183 | 0,003 | 442,1 | 289,1 | 1,69E-09 | 26,1 | 0,270 | 5,16E-05 | 215,9 | 0,86 |

| (fortgesetzt) Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_{sys} °C | c_{OH^-} mol/L | $c_{CO_3^{2-}}$ mol/L | $y_{CO_2,u}$ ppm | $y_{CO_2,o}$ ppm | $D_{CO_2,L}$ m ² /s | $H_{CO_2,L}$ bar·m ³ /kmol | $k_{OG}a_e$ 1/s | k_G' kmol/(m ² ·bar·s) | a_e m ² /m ³ | a_e/a_p |
|--------------------------|--------|--|------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|--|--------------------|--|---|-----------|
| RMP SP 250 | 1,46 | 60,0 | 1,02 | 18,5 | 0,182 | 0,003 | 446,2 | 289,2 | 1,69E-09 | 26,1 | 0,278 | 5,14E-05 | 222,6 | 0,89 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 10,0 | 1,02 | 18,7 | 0,181 | 0,004 | 433,8 | 317,9 | 1,70E-09 | 26,3 | 0,200 | 5,15E-05 | 160,0 | 0,64 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 20,0 | 1,02 | 18,7 | 0,181 | 0,004 | 447,0 | 313,2 | 1,70E-09 | 26,3 | 0,228 | 5,14E-05 | 182,5 | 0,73 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 30,0 | 1,03 | 18,6 | 0,180 | 0,004 | 452,1 | 309,5 | 1,69E-09 | 26,2 | 0,246 | 5,12E-05 | 197,7 | 0,79 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 40,0 | 1,03 | 18,5 | 0,178 | 0,004 | 457,3 | 303,0 | 1,69E-09 | 26,1 | 0,267 | 5,09E-05 | 216,0 | 0,86 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 50,0 | 1,02 | 18,4 | 0,180 | 0,004 | 453,8 | 291,1 | 1,68E-09 | 26,1 | 0,284 | 5,11E-05 | 229,5 | 0,92 |
| RMP SP 250 | 1,46 | 60,0 | 1,02 | 18,4 | 0,179 | 0,004 | 453,8 | 294,1 | 1,68E-09 | 26,0 | 0,279 | 5,09E-05 | 226,1 | 0,90 |
| RSP 250Y | 1,84 | 10,0 | 1,02 | 25,6 | 0,162 | 0,010 | 369,2 | 222,2 | 2,02E-09 | 31,9 | 0,262 | 5,43E-05 | 193,9 | 0,78 |
| RSP 250Y | 1,84 | 20,0 | 1,00 | 25,6 | 0,162 | 0,010 | 375,1 | 201,7 | 2,02E-09 | 31,9 | 0,315 | 5,43E-05 | 233,5 | 0,93 |
| RSP 250Y | 1,84 | 30,0 | 1,00 | 25,6 | 0,164 | 0,010 | 363,8 | 198,9 | 2,02E-09 | 31,9 | 0,306 | 5,47E-05 | 225,1 | 0,90 |
| RSP 250Y | 1,84 | 40,0 | 1,01 | 25,6 | 0,161 | 0,010 | 355,6 | 188,2 | 2,02E-09 | 31,8 | 0,327 | 5,42E-05 | 242,9 | 0,97 |
| RSP 250Y | 1,84 | 50,0 | 1,00 | 25,5 | 0,161 | 0,010 | 349,1 | 179,9 | 2,02E-09 | 31,8 | 0,335 | 5,42E-05 | 249,4 | 1,00 |
| RSP 250Y | 1,84 | 60,0 | 0,99 | 25,5 | 0,157 | 0,010 | 347,5 | 176,2 | 2,02E-09 | 31,8 | 0,340 | 5,35E-05 | 255,7 | 1,02 |
| RSP 250Y | 1,84 | 10,0 | 1,01 | 25,7 | 0,159 | 0,010 | 360,8 | 210,1 | 2,03E-09 | 32,0 | 0,276 | 5,40E-05 | 205,7 | 0,82 |
| RSP 250Y | 1,84 | 20,0 | 1,00 | 25,6 | 0,152 | 0,010 | 353,2 | 199,5 | 2,02E-09 | 31,7 | 0,291 | 5,27E-05 | 222,0 | 0,89 |
| RSP 250Y | 1,84 | 30,0 | 1,00 | 25,5 | 0,157 | 0,010 | 357,7 | 193,8 | 2,02E-09 | 31,8 | 0,312 | 5,35E-05 | 234,7 | 0,94 |
| RSP 250Y | 1,84 | 40,0 | 1,00 | 25,5 | 0,154 | 0,010 | 360,1 | 186,5 | 2,01E-09 | 31,7 | 0,334 | 5,30E-05 | 254,0 | 1,02 |
| RSP 250Y | 1,84 | 50,0 | 1,00 | 25,4 | 0,152 | 0,010 | 360,9 | 183,7 | 2,01E-09 | 31,6 | 0,343 | 5,26E-05 | 263,0 | 1,05 |
| RSP 250Y | 1,84 | 60,0 | 1,01 | 25,4 | 0,152 | 0,010 | 364,3 | 183,0 | 2,01E-09 | 31,6 | 0,352 | 5,26E-05 | 269,5 | 1,08 |

Tabelle 15: Versuchsdaten zu a_e am Versuchsstand V-150.

| Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_{sys} °C | c_{OH^-} mol/L | $c_{CO_3^{2-}}$ mol/L | $y_{CO_2,u}$ ppm | $y_{CO_2,o}$ ppm | $D_{CO_2,L}$ m ² /s | $H_{CO_2,L}$ bar·m ³ /kmol | $k_{OG}a_e$ 1/s | k_G' kmol/(m ² ·bar·s) | a_e m ² /m ³ | a_e/a_p |
|------------|--------|--|------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|--|--------------------|--|---|-----------|
| RMP N 250X | 1,06 | 12,4 | 0,49 | 21,1 | 0,106 | 0,002 | 384,8 | 303,6 | 1,85E-09 | 27,4 | 0,102 | 4,13E-05 | 100,9 | 0,40 |
| RMP N 250X | 1,06 | 21,8 | 0,49 | 21,1 | 0,106 | 0,002 | 390,0 | 292,4 | 1,85E-09 | 27,4 | 0,124 | 4,13E-05 | 122,5 | 0,49 |
| RMP N 250X | 1,06 | 30,9 | 0,49 | 21,1 | 0,106 | 0,002 | 392,8 | 285,9 | 1,85E-09 | 27,4 | 0,137 | 4,13E-05 | 135,8 | 0,54 |
| RMP N 250X | 1,06 | 39,0 | 0,49 | 21,1 | 0,103 | 0,001 | 400,4 | 282,2 | 1,86E-09 | 27,4 | 0,149 | 4,07E-05 | 150,1 | 0,60 |
| RMP N 250X | 1,06 | 61,6 | 0,49 | 21,1 | 0,103 | 0,001 | 403,0 | 275,1 | 1,86E-09 | 27,4 | 0,164 | 4,07E-05 | 164,8 | 0,66 |
| RMP N 250X | 1,06 | 79,9 | 0,49 | 21,1 | 0,102 | 0,002 | 404,2 | 274,7 | 1,85E-09 | 27,4 | 0,166 | 4,05E-05 | 167,3 | 0,67 |
| RMP N 250X | 1,06 | 11,1 | 1,00 | 20,8 | 0,101 | 0,003 | 405,6 | 357,1 | 1,83E-09 | 27,2 | 0,111 | 4,00E-05 | 113,8 | 0,46 |
| RMP N 250X | 1,06 | 21,7 | 1,00 | 20,7 | 0,101 | 0,003 | 404,4 | 346,7 | 1,83E-09 | 27,1 | 0,134 | 3,98E-05 | 138,0 | 0,55 |
| RMP N 250X | 1,06 | 30,5 | 1,00 | 20,6 | 0,101 | 0,003 | 406,1 | 344,4 | 1,82E-09 | 27,0 | 0,143 | 3,97E-05 | 147,7 | 0,59 |
| RMP N 250X | 1,06 | 40,2 | 1,00 | 20,5 | 0,102 | 0,007 | 409,0 | 343,3 | 1,79E-09 | 27,0 | 0,152 | 3,94E-05 | 158,2 | 0,63 |
| RMP N 250X | 1,06 | 60,5 | 1,00 | 20,4 | 0,102 | 0,007 | 408,4 | 338,6 | 1,79E-09 | 27,0 | 0,163 | 3,93E-05 | 169,6 | 0,68 |
| RMP N 250X | 1,06 | 79,7 | 1,00 | 20,4 | 0,099 | 0,003 | 406,3 | 336,2 | 1,81E-09 | 26,8 | 0,165 | 3,91E-05 | 172,7 | 0,69 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 9,3 | 0,49 | 20,7 | 0,101 | 0,003 | 425,2 | 342,9 | 1,82E-09 | 27,1 | 0,100 | 4,01E-05 | 102,3 | 0,41 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 20,5 | 0,49 | 20,7 | 0,101 | 0,003 | 436,5 | 325,1 | 1,82E-09 | 27,1 | 0,137 | 4,01E-05 | 140,1 | 0,56 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 29,9 | 0,50 | 20,7 | 0,101 | 0,003 | 434,2 | 319,4 | 1,82E-09 | 27,1 | 0,146 | 4,01E-05 | 149,0 | 0,60 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 41,6 | 0,50 | 20,7 | 0,099 | 0,005 | 432,8 | 313,1 | 1,81E-09 | 27,1 | 0,152 | 3,96E-05 | 157,7 | 0,63 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 59,6 | 0,49 | 20,7 | 0,099 | 0,005 | 433,5 | 302,2 | 1,81E-09 | 27,2 | 0,167 | 3,96E-05 | 172,5 | 0,69 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 79,8 | 0,49 | 20,8 | 0,099 | 0,006 | 431,6 | 295,5 | 1,81E-09 | 27,2 | 0,176 | 3,96E-05 | 181,6 | 0,73 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 9,2 | 1,00 | 21,0 | 0,097 | 0,007 | 427,0 | 381,0 | 1,81E-09 | 27,4 | 0,107 | 3,90E-05 | 112,5 | 0,45 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 20,5 | 0,99 | 20,9 | 0,097 | 0,007 | 426,5 | 371,7 | 1,81E-09 | 27,3 | 0,129 | 3,89E-05 | 135,8 | 0,54 |

| (fortgesetzt) Packung | Z m | u_L $m^3/(m^2 \cdot h)$ | F $Pa^{1/2}$ | T_{sys} $^{\circ}C$ | c_{OH^-} mol/L | $c_{CO_3^{2-}}$ mol/L | $y_{CO_2,u}$ ppm | $y_{CO_2,o}$ ppm | $D_{CO_2,L}$ m^2/s | $H_{CO_2,L}$ bar·m ³ /kmol | $k_{OG}a_e$ 1/s | k_G' kmol/(m ² ·bar·s) | a_e m ² /m ³ | a_e/a_p |
|--------------------------|----------|------------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|--|--------------------|--|---|-----------|
| RMP N 250Y | 0,99 | 30,1 | 0,99 | 20,8 | 0,097 | 0,007 | 425,9 | 366,4 | 1,80E-09 | 27,3 | 0,141 | 3,88E-05 | 148,5 | 0,59 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 40,9 | 0,99 | 20,7 | 0,095 | 0,008 | 424,5 | 360,8 | 1,79E-09 | 27,2 | 0,152 | 3,83E-05 | 162,6 | 0,65 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 60,8 | 0,99 | 20,7 | 0,095 | 0,008 | 423,6 | 356,8 | 1,79E-09 | 27,1 | 0,161 | 3,81E-05 | 172,5 | 0,69 |
| RMP N 250Y | 0,99 | 80,7 | 0,99 | 20,6 | 0,095 | 0,009 | 424,2 | 350,5 | 1,78E-09 | 27,1 | 0,178 | 3,79E-05 | 192,3 | 0,77 |
| RSP 250Y | 0,91 | 12,0 | 0,49 | 21,4 | 0,104 | 0,003 | 415,8 | 303,1 | 1,86E-09 | 27,7 | 0,159 | 4,10E-05 | 157,7 | 0,63 |
| RSP 250Y | 0,91 | 22,5 | 0,49 | 21,4 | 0,104 | 0,003 | 413,0 | 292,0 | 1,86E-09 | 27,7 | 0,174 | 4,11E-05 | 172,9 | 0,69 |
| RSP 250Y | 0,91 | 31,0 | 0,49 | 21,4 | 0,104 | 0,003 | 416,2 | 286,6 | 1,86E-09 | 27,7 | 0,187 | 4,11E-05 | 185,9 | 0,74 |
| RSP 250Y | 0,91 | 39,8 | 0,50 | 21,4 | 0,103 | 0,004 | 413,7 | 283,2 | 1,85E-09 | 27,7 | 0,192 | 4,09E-05 | 191,5 | 0,77 |
| RSP 250Y | 0,91 | 59,3 | 0,49 | 21,5 | 0,103 | 0,004 | 411,7 | 271,9 | 1,85E-09 | 27,8 | 0,208 | 4,09E-05 | 207,5 | 0,83 |
| RSP 250Y | 0,91 | 79,6 | 0,50 | 21,5 | 0,102 | 0,005 | 412,6 | 269,0 | 1,85E-09 | 27,8 | 0,216 | 4,06E-05 | 217,1 | 0,87 |
| RSP 250Y | 0,91 | 12,1 | 1,00 | 21,6 | 0,100 | 0,006 | 404,3 | 342,1 | 1,84E-09 | 27,8 | 0,170 | 4,01E-05 | 173,2 | 0,69 |
| RSP 250Y | 0,91 | 22,5 | 1,00 | 21,5 | 0,100 | 0,006 | 407,0 | 336,3 | 1,84E-09 | 27,8 | 0,193 | 4,00E-05 | 196,8 | 0,79 |
| RSP 250Y | 0,91 | 31,2 | 0,99 | 21,4 | 0,100 | 0,006 | 406,0 | 335,9 | 1,84E-09 | 27,7 | 0,191 | 3,99E-05 | 195,9 | 0,78 |
| RSP 250Y | 0,91 | 39,0 | 0,99 | 21,3 | 0,098 | 0,007 | 407,0 | 331,6 | 1,83E-09 | 27,7 | 0,207 | 3,95E-05 | 214,2 | 0,86 |
| RSP 250Y | 0,91 | 59,9 | 0,99 | 21,3 | 0,098 | 0,007 | 407,2 | 328,5 | 1,82E-09 | 27,7 | 0,216 | 3,94E-05 | 223,7 | 0,89 |
| RSP 250Y | 0,91 | 79,2 | 1,01 | 21,3 | 0,097 | 0,008 | 407,0 | 326,5 | 1,82E-09 | 27,6 | 0,225 | 3,90E-05 | 235,0 | 0,94 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 11,4 | 0,50 | 21,8 | 0,100 | 0,011 | 391,4 | 288,8 | 1,83E-09 | 28,1 | 0,135 | 4,01E-05 | 137,7 | 0,55 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 22,3 | 0,49 | 21,8 | 0,100 | 0,011 | 392,7 | 277,3 | 1,83E-09 | 28,1 | 0,153 | 4,00E-05 | 156,0 | 0,62 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 30,8 | 0,50 | 21,6 | 0,100 | 0,011 | 395,8 | 269,7 | 1,82E-09 | 27,9 | 0,172 | 3,99E-05 | 176,3 | 0,71 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 39,8 | 0,49 | 21,6 | 0,102 | 0,008 | 396,7 | 266,0 | 1,83E-09 | 27,9 | 0,177 | 4,03E-05 | 178,7 | 0,71 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 59,4 | 0,50 | 21,6 | 0,102 | 0,008 | 388,1 | 255,2 | 1,83E-09 | 27,9 | 0,187 | 4,03E-05 | 189,7 | 0,76 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 80,6 | 0,49 | 21,6 | 0,101 | 0,009 | 393,2 | 252,9 | 1,83E-09 | 28,0 | 0,195 | 4,02E-05 | 198,2 | 0,79 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 19,1 | 1,00 | 21,5 | 0,099 | 0,012 | 395,1 | 334,1 | 1,81E-09 | 27,9 | 0,150 | 3,94E-05 | 155,1 | 0,62 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 29,7 | 1,00 | 21,4 | 0,099 | 0,012 | 395,6 | 331,9 | 1,80E-09 | 27,8 | 0,156 | 3,93E-05 | 162,3 | 0,65 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 39,0 | 0,99 | 21,4 | 0,098 | 0,013 | 396,2 | 327,6 | 1,79E-09 | 27,8 | 0,169 | 3,90E-05 | 177,1 | 0,71 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 60,7 | 0,99 | 21,3 | 0,098 | 0,013 | 396,0 | 319,4 | 1,79E-09 | 27,8 | 0,191 | 3,89E-05 | 200,4 | 0,80 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 80,6 | 0,99 | 21,3 | 0,096 | 0,014 | 397,7 | 316,1 | 1,78E-09 | 27,8 | 0,203 | 3,85E-05 | 216,0 | 0,86 |

Anhang D: Versuchsdaten zu flüssigkeitsseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten $k_L a_e$

Tabelle 16: Versuchsdaten zu $k_L a_e$ am Versuchsstand V-422.

| Packung | Z m | u_L $m^3/(m^2 \cdot h)$ | F $Pa^{1/2}$ | T_{sys} $^{\circ}C$ | S_o ppm·s | S_a ppm·s | $\eta_{CO_2,L}$ % | $k_L a_e$ 1/s |
|------------|----------|------------------------------|-------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------------|------------------|
| RMP N 250X | 0,43 | 10,0 | 1,07 | 19,1 | 10979,6 | 2981,2 | 72,8 | 0,0084 |
| RMP N 250X | 0,43 | 20,0 | 1,02 | 19,0 | 12962,3 | 4660,9 | 64,0 | 0,0132 |
| RMP N 250X | 0,43 | 30,0 | 1,01 | 19,0 | 12902,8 | 5658,3 | 56,1 | 0,0159 |
| RMP N 250X | 0,43 | 40,0 | 1,01 | 18,9 | 12723,3 | 5407,1 | 57,5 | 0,0220 |
| RMP N 250X | 0,43 | 50,0 | 1,00 | 18,9 | 9944,7 | 5626,5 | 43,4 | 0,0183 |
| RMP N 250X | 0,43 | 60,0 | 1,01 | 17,6 | 9788,8 | 3788,0 | 61,3 | 0,0367 |
| RMP N 250X | 0,43 | 10,0 | 1,00 | 17,9 | 12255,3 | 2750,8 | 77,6 | 0,0096 |
| RMP N 250X | 0,43 | 20,0 | 1,01 | 18,0 | 14014,4 | 5122,9 | 63,4 | 0,0130 |
| RMP N 250X | 0,43 | 30,0 | 1,00 | 18,0 | 12980,5 | 5826,1 | 55,1 | 0,0155 |
| RMP N 250X | 0,43 | 40,0 | 1,00 | 18,0 | 12926,7 | 6048,4 | 53,2 | 0,0196 |

| (fortgesetzt) Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^½ | T _{sys} °C | S _o ppm·s | S _a ppm·s | η _{CO2,L} % | k _L a _e 1/s |
|--------------------------|--------|--|----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| RMP N 250X | 0,43 | 50,0 | 1,01 | 18,0 | 9477,2 | 6009,3 | 36,6 | 0,0147 |
| RMP N 250X | 0,43 | 60,0 | 1,07 | 17,9 | 9896,9 | 4760,7 | 51,9 | 0,0283 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 1,01 | 26,9 | 21556,7 | 8003,5 | 62,9 | 0,0070 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 20,0 | 1,01 | 24,9 | 21309,2 | 8498,6 | 60,1 | 0,0129 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 30,0 | 1,01 | 24,9 | 23000,4 | 9812,7 | 57,3 | 0,0180 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 40,0 | 1,00 | 24,9 | 23785,1 | 10727,5 | 54,9 | 0,0224 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 50,0 | 1,00 | 24,8 | 22865,5 | 11845,9 | 48,2 | 0,0231 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 60,0 | 0,98 | 24,1 | 26737,9 | 12493,5 | 53,3 | 0,0321 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 1,04 | 23,9 | 18233,3 | 6629,9 | 63,6 | 0,0071 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 20,0 | 1,03 | 23,4 | 23351,7 | 9703,7 | 58,4 | 0,0123 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 30,0 | 1,01 | 23,4 | 25818,8 | 10762,8 | 58,3 | 0,0184 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 40,0 | 1,00 | 23,4 | 27000,9 | 11755,6 | 56,5 | 0,0234 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 50,0 | 0,99 | 23,4 | 23595,7 | 11778,5 | 50,1 | 0,0244 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 60,0 | 0,97 | 23,4 | 23755,5 | 10877,9 | 54,2 | 0,0329 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 1,04 | 26,7 | 9023,4 | 3467,5 | 61,6 | 0,0063 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 20,0 | 1,03 | 26,5 | 13387,5 | 5323,7 | 60,2 | 0,0122 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 1,02 | 26,5 | 14603,7 | 5793,3 | 60,3 | 0,0183 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 40,0 | 1,01 | 26,5 | 16391,2 | 6442,8 | 60,7 | 0,0247 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 50,0 | 1,02 | 26,0 | 17440,4 | 7096,4 | 59,3 | 0,0297 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 60,0 | 1,00 | 25,5 | 17051,6 | 7104,3 | 58,3 | 0,0347 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 1,02 | 26,1 | 12198,7 | 2738,7 | 77,5 | 0,0099 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 20,0 | 1,01 | 26,2 | 12619,1 | 4308,5 | 65,9 | 0,0142 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 1,01 | 25,7 | 9444,1 | 4356,2 | 53,9 | 0,0153 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 40,0 | 1,02 | 25,7 | 8579,5 | 3966,8 | 53,8 | 0,0204 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 50,0 | 1,00 | 25,6 | 8262,2 | 3472,4 | 58,0 | 0,0286 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 60,0 | 0,99 | 25,4 | 29990,5 | 11797,7 | 60,7 | 0,0370 |
| RSP 250Y | 0,46 | 10,0 | 1,00 | 30,3 | 6181,5 | 1546,4 | 75,0 | 0,0084 |
| RSP 250Y | 0,46 | 20,0 | 0,98 | 19,2 | 9844,7 | 2521,5 | 74,4 | 0,0164 |
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 1,04 | 19,2 | 10184,6 | 3015,0 | 70,4 | 0,0220 |
| RSP 250Y | 0,46 | 40,0 | 1,01 | 19,1 | 10284,1 | 3945,4 | 61,6 | 0,0231 |
| RSP 250Y | 0,46 | 50,0 | 1,01 | 19,1 | 9231,8 | 3849,2 | 58,3 | 0,0264 |
| RSP 250Y | 0,46 | 60,0 | 1,01 | 26,8 | 10221,6 | 4254,4 | 58,4 | 0,0317 |
| RSP 250Y | 0,46 | 10,0 | 1,02 | 28,0 | 13783,7 | 2562,7 | 81,4 | 0,0101 |
| RSP 250Y | 0,46 | 20,0 | 1,02 | 18,5 | 18579,6 | 4870,8 | 73,8 | 0,0162 |
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 1,02 | 18,5 | 21765,1 | 7591,9 | 65,1 | 0,0191 |
| RSP 250Y | 0,46 | 40,0 | 1,02 | 18,5 | 28698,7 | 8960,4 | 68,8 | 0,0281 |
| RSP 250Y | 0,46 | 50,0 | 1,02 | 18,5 | 32686,2 | 11468,3 | 64,9 | 0,0316 |
| RSP 250Y | 0,46 | 60,0 | 1,02 | 25,5 | 31251,2 | 13188,3 | 57,8 | 0,0312 |

Tabelle 17: Versuchsdaten zu k_{La_e} am Versuchsstand V-150.

| Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_{sys} °C | S_o ppm·s | S_a ppm·s | $\eta_{CO_2,L}$ % | k_{La_e} 1/s |
|------------|--------|--|------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------------|-------------------|
| RMP N 250X | 1,07 | 11,3 | 1,03 | 23,7 | 39387,8 | 2389,1 | 93,9 | 0,0082 |
| RMP N 250X | 1,07 | 19,5 | 1,03 | 23,4 | 23552,4 | 2846,2 | 87,9 | 0,0107 |
| RMP N 250X | 1,07 | 40,2 | 1,02 | 23,3 | 22265,0 | 2857,0 | 87,2 | 0,0214 |
| RMP N 250X | 1,07 | 60,1 | 1,02 | 23,2 | 18764,3 | 3107,8 | 83,4 | 0,0281 |
| RMP N 250X | 1,07 | 80,2 | 1,00 | 23,2 | 17219,4 | 3391,9 | 80,3 | 0,0338 |
| RMP N 250X | 1,07 | 20,3 | 1,04 | 22,8 | 15494,3 | 1719,6 | 88,9 | 0,0116 |
| RMP N 250X | 1,07 | 39,8 | 1,03 | 22,9 | 14888,4 | 1935,6 | 87,0 | 0,0211 |
| RMP N 250X | 1,07 | 79,4 | 1,01 | 23,0 | 14030,7 | 2345,6 | 83,3 | 0,0369 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 9,8 | 0,99 | 21,6 | 23695,8 | 819,0 | 96,5 | 0,0093 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 21,3 | 0,99 | 22,2 | 19494,5 | 1315,7 | 93,3 | 0,0162 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 39,7 | 0,99 | 22,4 | 18740,7 | 1733,2 | 90,8 | 0,0267 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 59,3 | 0,99 | 22,5 | 17635,9 | 1874,1 | 89,4 | 0,0376 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 79,8 | 0,99 | 22,6 | 16345,4 | 2166,8 | 86,7 | 0,0455 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 12,4 | 1,06 | 21,9 | 18200,4 | 1471,5 | 91,9 | 0,0088 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 19,7 | 1,07 | 22,0 | 17752,3 | 1786,4 | 89,9 | 0,0128 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 40,7 | 1,05 | 22,2 | 17316,6 | 2001,7 | 88,4 | 0,0248 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 60,8 | 1,02 | 22,4 | 13191,9 | 2229,0 | 83,1 | 0,0306 |
| RMP N 250Y | 0,98 | 79,6 | 0,99 | 22,5 | 11758,7 | 1967,8 | 83,3 | 0,0402 |
| RSP 250Y | 0,91 | 9,5 | 1,02 | 20,5 | 23296,5 | 1006,8 | 95,7 | 0,0091 |
| RSP 250Y | 0,91 | 21,5 | 1,02 | 20,7 | 26063,8 | 2145,1 | 91,8 | 0,0164 |
| RSP 250Y | 0,91 | 42,4 | 1,01 | 20,8 | 26143,3 | 2955,2 | 88,7 | 0,0281 |
| RSP 250Y | 0,91 | 59,1 | 1,01 | 20,8 | 25851,7 | 3734,2 | 85,6 | 0,0348 |
| RSP 250Y | 0,91 | 79,5 | 1,00 | 20,8 | 25146,2 | 3904,8 | 84,5 | 0,0450 |
| RSP 250Y | 0,91 | 11,4 | 1,02 | 20,6 | 25380,4 | 1056,3 | 95,8 | 0,0110 |
| RSP 250Y | 0,91 | 20,8 | 1,03 | 20,6 | 25042,6 | 1678,5 | 93,3 | 0,0171 |
| RSP 250Y | 0,91 | 40,1 | 1,02 | 20,7 | 26735,0 | 2691,3 | 89,9 | 0,0280 |
| RSP 250Y | 0,91 | 60,4 | 1,01 | 20,8 | 24310,6 | 3460,0 | 85,8 | 0,0359 |
| RSP 250Y | 0,91 | 79,8 | 1,00 | 20,8 | 23565,7 | 3554,8 | 84,9 | 0,0459 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 10,2 | 0,99 | 22,9 | 17073,6 | 642,6 | 96,2 | 0,0090 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 19,6 | 0,99 | 23,4 | 15700,2 | 813,5 | 94,8 | 0,0156 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 40,2 | 0,99 | 23,7 | 15039,7 | 1871,6 | 87,6 | 0,0225 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 58,6 | 0,99 | 23,8 | 14419,1 | 1832,6 | 87,3 | 0,0324 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 80,8 | 0,99 | 23,8 | 13873,4 | 3397,6 | 75,5 | 0,0305 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 9,4 | 0,99 | 22,6 | 14426,9 | 767,8 | 94,7 | 0,0074 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 19,4 | 1,00 | 22,8 | 13668,0 | 822,0 | 94,0 | 0,0146 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 40,4 | 0,99 | 23,2 | 13018,2 | 1265,7 | 90,3 | 0,0252 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 59,1 | 0,99 | 23,4 | 11608,1 | 1499,0 | 87,1 | 0,0324 |
| RMP SP 250 | 1,04 | 79,7 | 0,99 | 23,5 | 10618,9 | 2164,9 | 79,6 | 0,0340 |

Anhang E: Versuchsdaten zu gaseitigen vol. Stoffübergangskoeffizienten k_{GA_e}

Tabelle 18: Versuchsdaten zu k_{GA_e} am Versuchsstand V-422.

| Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^½ | T_{sys} °C | $y_{SO_2,u}$ ppm | $y_{SO_2,o}$ ppm | $\eta_{SO_2,G}$ % | k_{GA_e} 1/s |
|------------|----------|--|------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| RMP N 250X | 0,44 | 10,0 | 0,58 | 18,2 | 1079,2 | 58,9 | 94,5 | 3,5 |
| RMP N 250X | 0,44 | 10,0 | 0,92 | 18,7 | 918,8 | 103,5 | 88,7 | 4,2 |
| RMP N 250X | 0,44 | 10,0 | 1,53 | 18,7 | 1032,7 | 168,7 | 83,7 | 5,8 |
| RMP N 250X | 0,44 | 10,0 | 2,04 | 18,6 | 1113,0 | 222,2 | 80,0 | 6,9 |
| RMP N 250X | 0,44 | 10,0 | 2,56 | 18,6 | 1040,9 | 229,7 | 77,9 | 8,1 |
| RMP N 250X | 0,44 | 10,0 | 3,07 | 18,6 | 928,2 | 206,6 | 77,7 | 9,6 |
| RMP N 250X | 0,44 | 30,0 | 0,58 | 18,6 | 1049,1 | 26,0 | 97,5 | 4,5 |
| RMP N 250X | 0,44 | 30,0 | 1,02 | 18,6 | 966,1 | 54,5 | 94,4 | 6,1 |
| RMP N 250X | 0,44 | 30,0 | 1,53 | 18,6 | 1004,4 | 92,1 | 90,8 | 7,6 |
| RMP N 250X | 0,44 | 30,0 | 2,05 | 18,6 | 1122,7 | 134,8 | 88,0 | 9,1 |
| RMP N 250X | 0,44 | 30,0 | 2,58 | 18,5 | 1048,0 | 145,6 | 86,1 | 10,6 |
| RMP N 250X | 0,44 | 30,0 | 3,11 | 18,5 | 940,7 | 143,6 | 84,7 | 12,2 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 0,58 | 21,9 | 886,7 | 48,3 | 94,6 | 3,9 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 1,07 | 21,8 | 1069,1 | 114,7 | 89,3 | 5,6 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 1,53 | 21,6 | 934,2 | 139,6 | 85,1 | 6,8 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 2,06 | 21,4 | 946,7 | 173,4 | 81,7 | 8,1 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 2,58 | 21,3 | 1035,8 | 211,2 | 79,6 | 9,6 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 10,0 | 3,12 | 21,2 | 1017,9 | 209,3 | 79,4 | 11,5 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 30,0 | 0,57 | 21,3 | 959,4 | 13,3 | 98,6 | 5,7 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 30,0 | 1,06 | 21,1 | 1104,5 | 39,9 | 96,4 | 8,2 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 30,0 | 1,55 | 21,0 | 1085,4 | 64,2 | 94,1 | 10,2 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 30,0 | 2,12 | 21,0 | 1071,1 | 82,2 | 92,3 | 12,7 |
| RMP N 250Y | 0,40 | 30,0 | 2,59 | 20,9 | 1075,4 | 88,9 | 91,7 | 15,1 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 0,58 | 21,9 | 975,7 | 73,5 | 92,5 | 3,3 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 1,07 | 21,8 | 902,1 | 124,0 | 86,3 | 4,7 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 1,53 | 21,6 | 998,5 | 184,6 | 81,5 | 5,7 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 2,06 | 21,4 | 1033,2 | 224,0 | 78,3 | 6,9 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 2,58 | 21,3 | 1034,5 | 242,9 | 76,5 | 8,2 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 10,0 | 3,12 | 21,2 | 930,5 | 214,1 | 77,0 | 10,0 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 0,57 | 21,3 | 921,7 | 21,9 | 97,6 | 4,7 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 1,06 | 21,1 | 1029,2 | 64,2 | 93,8 | 6,5 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 1,55 | 21,0 | 1106,4 | 105,8 | 90,4 | 8,0 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 2,12 | 21,0 | 1024,6 | 121,3 | 88,2 | 9,9 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 2,59 | 20,9 | 1041,0 | 139,3 | 86,6 | 11,4 |
| RMP SP 250 | 0,42 | 30,0 | 3,13 | 20,9 | 1023,7 | 140,8 | 86,2 | 13,6 |
| RSP 250Y | 0,46 | 10,0 | 2,03 | 17,7 | 1223,5 | 42,3 | 96,5 | 13,6 |
| RSP 250Y | 0,46 | 10,0 | 2,59 | 17,9 | 929,3 | 42,9 | 95,4 | 15,9 |
| RSP 250Y | 0,46 | 10,0 | 3,35 | 17,8 | 761,8 | 40,6 | 94,7 | 19,6 |
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 0,52 | 19,0 | 1973,8 | 5,8 | 99,7 | 6,1 |
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 1,02 | 19,0 | 1023,1 | 15,0 | 98,5 | 8,6 |
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 1,54 | 18,7 | 1024,0 | 31,5 | 96,9 | 10,7 |

| (fortgesetzt) Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_{sys} °C | $y_{\text{SO}_2,u}$ ppm | $y_{\text{SO}_2,o}$ ppm | $\eta_{\text{SO}_2,G}$ % | k_{GAe} 1/s |
|--------------------------|--------|--|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 1,81 | 18,6 | 1052,1 | 43,2 | 95,9 | 11,5 |
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 2,56 | 18,6 | 1040,3 | 48,1 | 95,4 | 15,7 |
| RSP 250Y | 0,46 | 30,0 | 2,80 | 18,5 | 996,5 | 34,2 | 96,6 | 18,8 |

Tabelle 19: Versuchsdaten zu k_{GAe} am Versuchsstand V-150.

| Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T_{sys} °C | $y_{\text{SO}_2,u}$ ppm | $y_{\text{SO}_2,o}$ ppm | $\eta_{\text{SO}_2,G}$ % | k_{GAe} 1/s |
|------------|--------|--|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|
| RMP N 250X | 0,65 | 10,2 | 0,50 | 22,8 | 1070,5 | 21,8 | 98,0 | 2,8 |
| RMP N 250X | 0,65 | 10,3 | 0,70 | 22,8 | 1034,7 | 33,0 | 96,8 | 3,5 |
| RMP N 250X | 0,65 | 10,4 | 0,99 | 22,8 | 1066,3 | 53,4 | 95,0 | 4,3 |
| RMP N 250X | 0,65 | 10,4 | 1,50 | 22,6 | 1064,3 | 78,6 | 92,6 | 5,7 |
| RMP N 250X | 0,65 | 10,5 | 2,01 | 22,3 | 1035,2 | 97,8 | 90,6 | 6,9 |
| RMP N 250X | 0,65 | 10,6 | 2,53 | 22,0 | 1034,3 | 107,8 | 89,6 | 8,3 |
| RMP N 250X | 0,65 | 10,8 | 2,99 | 21,6 | 1041,3 | 102,3 | 90,2 | 10,1 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,1 | 0,49 | 23,5 | 1026,1 | 14,3 | 98,6 | 3,1 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,2 | 0,70 | 23,4 | 1154,7 | 19,3 | 98,3 | 4,2 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,2 | 0,99 | 23,2 | 1034,7 | 34,6 | 96,7 | 5,0 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,2 | 1,50 | 22,9 | 1049,2 | 39,7 | 96,2 | 7,2 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,2 | 2,00 | 22,5 | 1027,8 | 53,5 | 94,8 | 8,6 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,2 | 2,49 | 21,9 | 995,3 | 55,2 | 94,5 | 10,5 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,2 | 2,99 | 21,4 | 980,7 | 50,9 | 94,8 | 12,9 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,0 | 0,49 | 21,5 | 1078,1 | 13,1 | 98,8 | 3,2 |
| RMP N 250X | 0,65 | 31,0 | 0,69 | 21,6 | 1023,0 | 22,0 | 97,8 | 3,9 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,3 | 0,50 | 23,7 | 1069,0 | 17,6 | 98,4 | 3,3 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,4 | 0,69 | 23,5 | 1022,4 | 24,6 | 97,6 | 4,1 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,4 | 1,00 | 23,2 | 1026,8 | 38,2 | 96,3 | 5,3 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,5 | 1,50 | 22,8 | 1039,5 | 55,1 | 94,7 | 7,0 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,5 | 2,00 | 22,3 | 1009,9 | 68,5 | 93,2 | 8,6 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,7 | 2,50 | 21,7 | 992,1 | 63,5 | 93,6 | 11,0 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,8 | 3,00 | 21,1 | 976,5 | 58,7 | 94,0 | 13,5 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 9,7 | 0,49 | 22,0 | 1054,9 | 16,1 | 98,5 | 3,3 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 9,7 | 0,99 | 22,1 | 1042,9 | 34,9 | 96,7 | 5,4 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 9,8 | 2,00 | 21,7 | 1012,4 | 61,1 | 94,0 | 9,0 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 10,1 | 3,00 | 21,4 | 995,7 | 62,9 | 93,7 | 13,3 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 30,8 | 0,50 | 23,2 | 1057,9 | 9,2 | 99,1 | 3,8 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 29,4 | 0,69 | 22,8 | 1037,0 | 11,2 | 98,9 | 5,0 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 29,4 | 0,99 | 22,6 | 1056,3 | 17,6 | 98,3 | 6,5 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 29,4 | 1,49 | 22,2 | 1054,9 | 23,3 | 97,8 | 9,1 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 29,4 | 1,99 | 21,7 | 1033,0 | 29,3 | 97,2 | 11,4 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 29,5 | 2,50 | 21,2 | 1015,0 | 32,5 | 96,8 | 13,8 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 29,7 | 2,99 | 20,6 | 1006,4 | 18,7 | 98,1 | 19,1 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 31,2 | 0,99 | 20,7 | 1050,9 | 17,0 | 98,4 | 6,6 |
| RMP N 250Y | 0,59 | 29,4 | 2,99 | 20,1 | 993,3 | 14,0 | 98,6 | 20,3 |

| (fortgesetzt) Packung | Z m | u_L m ³ /(m ² ·h) | F Pa ^{1/2} | T _{sys} °C | y _{SO_{2,u}} ppm | y _{SO_{2,o}} ppm | η _{SO_{2,G}} % | k _{GAe} 1/s |
|--------------------------|--------|--|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| RMP SP 250 | 0,62 | 12,9 | 0,51 | 23,4 | 1071,5 | 21,7 | 98,0 | 3,0 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 12,9 | 0,69 | 23,1 | 1060,3 | 30,1 | 97,2 | 3,7 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 12,9 | 1,00 | 22,6 | 1064,6 | 48,1 | 95,5 | 4,7 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 12,9 | 1,50 | 22,1 | 1058,1 | 65,8 | 93,8 | 6,3 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 12,9 | 2,00 | 21,6 | 1032,0 | 80,7 | 92,2 | 7,7 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 13,0 | 2,50 | 21,0 | 1011,0 | 82,6 | 91,8 | 9,5 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 13,1 | 3,00 | 20,3 | 997,2 | 72,7 | 92,7 | 11,9 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,1 | 0,49 | 20,9 | 1141,1 | 18,8 | 98,3 | 3,1 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,1 | 0,69 | 21,0 | 1076,9 | 26,3 | 97,6 | 3,9 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,2 | 1,00 | 21,0 | 1066,1 | 42,2 | 96,0 | 4,9 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,2 | 1,50 | 20,9 | 1055,4 | 57,5 | 94,5 | 6,6 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,2 | 2,00 | 20,6 | 1025,7 | 71,3 | 93,1 | 8,1 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,1 | 2,50 | 20,3 | 1006,6 | 67,1 | 93,3 | 10,3 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,0 | 3,00 | 19,9 | 988,5 | 58,4 | 94,1 | 12,9 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 29,8 | 1,00 | 20,0 | 1059,8 | 42,0 | 96,0 | 4,9 |
| RMP SP 250 | 0,62 | 30,1 | 3,00 | 19,6 | 984,5 | 61,4 | 93,8 | 12,6 |
| RSP 250Y | 0,68 | 11,6 | 0,49 | 21,8 | 1059,6 | 6,2 | 99,4 | 3,5 |
| RSP 250Y | 0,68 | 11,5 | 0,69 | 21,7 | 1023,6 | 6,3 | 99,4 | 4,9 |
| RSP 250Y | 0,68 | 11,4 | 1,00 | 21,6 | 1032,5 | 11,8 | 98,9 | 6,2 |
| RSP 250Y | 0,68 | 11,4 | 1,50 | 20,2 | 1027,0 | 16,0 | 98,4 | 8,6 |
| RSP 250Y | 0,68 | 11,4 | 2,00 | - | 1013,8 | 25,4 | 97,5 | 10,2 |
| RSP 250Y | 0,68 | 11,6 | 2,49 | 19,9 | 1001,7 | 27,0 | 97,3 | 12,5 |
| RSP 250Y | 0,68 | 11,8 | 3,00 | - | 980,5 | 24,7 | 97,5 | 15,2 |
| RSP 250Y | 0,68 | 10,0 | 2,00 | 19,4 | 1028,2 | 18,2 | 98,2 | 11,1 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,6 | 0,49 | 22,7 | 1083,7 | 6,0 | 99,4 | 3,6 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,5 | 0,70 | 22,4 | 1044,6 | 4,5 | 99,6 | 5,3 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,6 | 0,90 | 22,1 | 1075,7 | 6,0 | 99,4 | 6,5 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,5 | 1,00 | 21,9 | 1064,8 | 5,3 | 99,5 | 7,4 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,5 | 1,20 | 21,6 | 1089,9 | 7,0 | 99,4 | 8,4 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,5 | 1,50 | 21,2 | 1061,4 | 7,4 | 99,3 | 10,3 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,5 | 2,00 | 20,9 | 1036,3 | 11,2 | 98,9 | 12,5 |
| RSP 250Y | 0,68 | 30,5 | 2,50 | 20,2 | 1012,4 | 11,5 | 98,9 | 15,5 |
| RSP 250Y | 0,68 | 29,3 | 1,49 | 19,0 | 1041,4 | 11,3 | 98,9 | 9,3 |
| RSP 250Y | 0,68 | 29,5 | 2,00 | 18,9 | 1022,4 | 11,1 | 98,9 | 12,5 |