

## Vorwort des Herausgebers

Die Aufbereitung von Wasser ist eine weitreichende Aufgabe, die aus verschiedenen Gründen von großer Bedeutung ist. So ist in besonders niederschlagsarmen Regionen dieser Welt die Bereitstellung von Trinkwasser lebenswichtig und eine der größten Herausforderungen überhaupt. Noch viel größer ist der Wasserbedarf für Landwirtschaft, Industrie und andere Zwecke im Haushalt. Dessen Deckung gelingt zumindest in küstennahen Regionen vor allem durch die Entsalzung von Meerwasser. Hierfür haben sich mehrere verfahrenstechnische Konzepte bewährt, die auf thermischen und zunehmend auf osmotischen Effekten beruhen. Insbesondere die Umkehrosmose wird zur Meerwasserentsalzung großtechnisch eingesetzt.

Aber auch unabhängig vom Bedarf an sauberem und sogar trinkbarem Wasser stellt sich die Herausforderung, verschmutztes Wasser zumindest soweit zu reinigen, dass es problemlos an die Umwelt abgeführt werden kann, ohne diese zu schädigen und mittelbar damit auch uns Menschen gesundheitlich zu gefährden. Hier ist vor allem ölhaltiges Wasser zu nennen, wie es in vielen Industrieprozessen in großen Mengen oder als Sonderfall als Bilgenwasser in der Schifffahrt auftritt. Auch zur Bewältigung dieser Aufgabe wurden im Laufe der Zeit verschiedene Techniken und Anlagen mit einigen Varianten entwickelt, unter denen je nach Anwendungsfall und Randbedingungen ausgewählt wird.

Für derartige Aufgabenstellungen kommen auch solche thermischen Verfahren in Betracht, die in ihrer prinzipiellen Wirkungsweise den natürlichen Wasserkreislauf nachahmen. Hierzu zählt der sogenannte Humidification–Dehumidification Process, kurz HDH-Prozess. Bei ihm wird das aufzubereitende Wasser (z. B. des Meeres) erhitzt und ein Luftstrom mit dessen Dampf zunächst befeuchtet und in einem nächsten Schritt durch Kondensation wieder entfeuchtet. Herausforderungen bei der technischen Umsetzung im größeren Maßstab sind unter anderem die Erhöhung der energetischen Effizienz und der Geschwindigkeit des Ablaufs. Auf der Seite der Befeuchtung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Hierbei erscheint insbesondere auch die Nutzung von Blasensäulen für den HDH-Prozess aussichtsreich, jedoch bislang noch nicht hinreichend erforscht.

Der Autor dieser Abhandlung hat sich in einer Kooperation mit der FH Vorarlberg in den dortigen Einrichtungen mit der Thematik der Wasseraufbereitung unter Nutzung von Blasensäulen eingehend ingenieurwissenschaftlich beschäftigt. Seine Vorgehensweise und Ergebnisse stellt er im vorliegenden Band vor.

## Vorwort des Autors

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Energie der Fachhochschule Vorarlberg in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse der Universität Bayreuth. Zwischen 2018 und 2022 beschäftigte ich mich im Rahmen eines vom *FWF der Wissenschaftsfonds* unter der Projektnummer P31103 geförderten Projekts mit der Befeuchtung von Luft in einem Blasensäulenbefeuchter zur thermischen Wasseraufbereitung.

Ich möchte zuerst meinem Betreuer Prof. (FH) Dr.-Ing. Markus Preißinger für die durchwegs angenehme, sehr professionelle sowie höchst kompetente fachliche und organisatorische Betreuung danken. Dieser hat es zu jeder Zeit geschafft, den Überblick zu behalten, wenn ich mich in Details verrannt habe. Unsere Zusammenarbeit war und ist stets von gegenseitiger Wertschätzung geprägt.

Außerdem möchte ich Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann, der die universitätsseitige Betreuung der Arbeit übernommen hat, danken. Von seiner unkomplizierten Art und fachlichen Expertise konnte ich sehr profitieren.

Ich möchte mich auch beim Drittprüfer Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess sowie beim Vorsitzenden der Prüfungskommission Prof. Dr.-Ing. Uwe Glatzel recht herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern des Forschungszentrums Energie der Fachhochschule Vorarlberg für viele ausgedehnte Diskussionen sowie gemeinsame Erfolge und Misserfolge. Herausheben möchte ich dabei Miriam Kadinger, Helena Gössler, Gerhard Huber, Stefan Arzbacher, Nima Rahmatian, Anupam Akolkar und Sandro Hiller. Danke auch an alle studentischen Mitarbeiter, die mich im Zuge von Studienprogrammen oder durch Masterarbeiten unterstützt haben.

Danken möchte ich auch dem *Research Institute of Textile Chemistry and Textile Physics* der Universität Innsbruck für die Unterstützung bei der Infrarotspektroskopie und der Karl-Fischer Titration. Dieser Dank geht insbesondere an Michael Cordin, der mir einen spannenden Einblick in die Welt der analytischen Chemie gegeben hat.

Ich möchte auch meiner gesamten Familie danken, die mir stets eine moralische Stütze ist und auf die ich immer zählen kann.

Der größte Dank gilt meiner Partnerin Sara, die immer an meiner Seite ist und einen maßgeblichen Anteil an diesem Erfolg hat.

## Kurzfassung

Aufgrund der zunehmenden Wasserknappheit und dem Wandel in Richtung erneuerbarer Energien hat die Forschung an alternativen Prozessen zur Wasseraufbereitung in den letzten Jahren einen starken Aufwärtstrend erfahren. Neuartige Prozesse sollten (1) dezentral in ländlichen Regionen einsetzbar sein, (2) mit erneuerbaren Energien betrieben werden, (3) einen geringen Wartungsaufwand besitzen und (4) mit unterschiedlichen verunreinigten Flüssiggemischen betrieben werden können. Der Befeuchtungs-Entfeuchtungs-Prozess (kurz: HDH-Prozess) erfüllt diese Kriterien, weswegen dieser ein vielversprechender Kandidat zur Bekämpfung von Wasserknappheit in ländlichen Regionen ist.

Zur Befeuchtung der Luft werden in diesem Prozess häufig Blasensäulen eingesetzt, da diese einen ausgezeichneten Wärme- und Stofftransport aufweisen. Ein fehlendes Verständnis der Luftbefeuchtung in einer Blasensäule verhindert jedoch bis zum aktuellen Stand eine Optimierung des Designs und der Betriebsweise solcher Anlagen.

In der vorliegenden Arbeit werden grundlegende Untersuchungen zur Befeuchtung von Luft in Blasensäulen durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, das Verständnis der Befeuchtung sowie der maßgeblichen Betriebsparameter zu verbessern. Darauf aufbauend können Empfehlungen für das Design und den Betrieb solcher Anlagen gegeben werden.

An einem eigens entwickelten und für diesen Zweck optimierten Versuchsaufbau werden empirische Messungen zur Luftbefeuchtung durchgeführt. Variiert werden dabei einerseits die maßgeblichen Betriebsparameter und andererseits die Betriebsweise des Systems (kontinuierlich oder als Batch-Verfahren). Darüber hinaus werden Messungen mit den flüssigen Medien Trinkwasser, Meerwasser und einer Öl-Wasser-Emulsion durchgeführt. Die optische Zugänglichkeit des Systems erlaubt eine quantitative Analyse des Strömungsregimes und der Blasengröße während des Betriebs.

Es zeigt sich, dass die Befeuchtung der Luft bereits bei Füllständen von kleiner als 3 cm zu einem maßgeblichen Anteil stattfindet. Dennoch werden Blasensäulenbefeuchter bisher für wesentlich höhere Füllstände dimensioniert, was sich negativ auf Investitions- und Betriebskosten auswirkt.

Durch die Entwicklung einer verbesserten Methodik werden erstmals die volumetrischen Transportkoeffizienten modelliert und präsentiert. Über das mathematische Modell des Wärme- und Stofftransports lassen sich damit die zu erwartenden Austrittsbedingungen der Luft in Abhängigkeit der Betriebsparameter bestimmen. Basierend auf den parametrischen Messungen zur Quantifizierung des Wärme- und Stofftransports wird ein Konturplot der Befeuchtereffizienz erstellt, über den relevante Grenzen für die Betriebsparameter abgeleitet werden können, sowohl für den Einsatz im industriellen Umfeld als auch für zukünftige wissenschaftliche Studien.

# Abstract

As for the increasing water scarcity and a growing trend towards renewable energy, recent research in water treatment has been focusing on alternative processes. These processes should (1) be applicable for remote regions and in a decentralized manner, (2) be powered by renewable energy, (3) have low maintenance requirements and (4) be insensitive to various feed liquids. The humidification-dehumidification process for desalination (short: HDH) fulfills these requirements, making it suitable for addressing water scarcity issues in rural areas.

Bubble columns are commonly used as air humidifiers in HDH, as they have superior heat and mass transfer characteristics. Unfortunately, the lack of fundamental understanding of the humidification itself has prevented an optimized design and operation of these devices.

In this thesis, a fundamental characterization of the humidification process in a bubble column is conducted. By developing a general understanding of the impact of the main operating parameters, recommendations for the design and operation of bubble column humidifiers are given.

Empirical measurements of the humidification are conducted on a self-developed and optimized test setup. For the measurements, the main operating parameters and the operating mode (continuously or batch-wise) are varied. Moreover, measurements are conducted for three different liquid media: tap water, saline water, and a specified oil-water emulsion. The measurement setup further grants optical access, allowing for the quantitative analysis of the flow regime and the bubble size while operating.

The results show that the most significant part of the humidification is taking place at liquid heights below 3 cm. In contrast, bubble column humidifiers have been designed for much higher liquid heights, resulting in higher investment and operating costs.

The volumetric transport coefficients are modeled and presented by using an improved method. These characterize the direct heat and mass transfer between the air bubbles and the liquid phase. Subsequently, the developed mathematical model can be used to determine the air state at the humidifier outlet for various parametric settings. A humidifier efficiency plot is deduced based on these measurements, indicating the relevant ranges of the superficial air velocity and the liquid height for industrial applications and further scientific studies.