

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

27/04/2015

LDEC

Projektnummer:834570

Neue Energien 2020 - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	5. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Projektstart	01/03/2012
Projektende	31/12/2014
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	34 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology GmbH – Energy Department
AnsprechpartnerIn	Johann Emhofer
Postadresse	Giefinggasse 2, 1210 Wien
Telefon	+4350550-6061
Fax	+4350550-6679
E-mail	Johann.emhofer@ait.ac.at
Website	http://www.ait.ac.at

LDEC

Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten neuer Arbeitsstoffe in
Liquid Desiccant (LDEC) Systemen zur Raumluftkonditionierung

AutorInnen:

J. Emhofer¹, P. Dudzinski¹, T. Fleckl¹,

B. Beladi², H. Kuhlmann²,

M. Teubel³, und C. Braunegg³

¹ AIT Austrian Institute of Technology, Energy Department, Giefinggasse 2, 1210 Wien

² TU Wien, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Getreidemarkt 9, 1060 Wien

³ Troges Gesellschaft für Trocknungs- und Wärmetechnik m.b.H., Puchgasse 3, 1220 Wien

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	7
3.1	Modelbildung und detaillierte Simulationen des Fallfilms	7
3.2	Experimente an den offenen Apparaturen	8
3.3	Technisch- wirtschaftliche Analyse und Gesamtsystembetrachtungen	12
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	13
4.1	Modelbildung und detaillierte Simulationen des Fallfilms	13
4.2	Experimente an den offenen Apparaturen	16
4.3	Technisch- wirtschaftliche Analyse und Gesamtsystembetrachtungen	21
5	Ausblick und Empfehlungen	25
6	Literaturverzeichnis	26
7	Anhang	26
7.1	Rahmenbedingungen für die Gesamtsystems simulation	26
8	Kontakt Daten	28

2 Einleitung

Gegenüber konventionellen Systemen mit Kompressionskältemaschinen weisen sorptive Systeme zu Raumluftkonditionierung, sogenannte „Desiccant Systeme“ (DEC), einerseits eine größere Gesamteffizienz auf, was den Primärenergieeinsatz reduziert, andererseits kann zum Antrieb dieser Systeme Niedertemperaturwärme eingesetzt werden, was deren Stromverbrauch drastisch reduzieren kann. Bislang konnten sich solche Systeme am Markt nicht durchsetzen da die derzeit eingesetzten Arbeitsstoffe (Salzlösungen) als sehr problematisch aufgrund der Korrosions- und Kristallisationsprobleme gelten. Diese fundamentalen Probleme könnten durch den Einsatz ionischer Flüssigkeiten als neuer Arbeitsstoff überwunden werden.

Das Projekt „LDEC“, das durch das AIT, die TU Wien und die Fa. Troges durchgeführt wurde, behandelte prioritär den Schwerpunkt 3.2 Energieeffizienz, Subschwerpunkt: 3.2.2 Energieeffiziente Produkte und Komponenten in der 5. Ausschreibung Neue Energien 2020. Begründung: Der Energiebedarf zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HLK) von Gebäuden stellt mit ca. 30 % einen wesentlichen Anteil des Endenergieverbrauchs in Österreich wie auch in Europa dar und trägt somit substantiell zu den CO₂-Emissionen bei. Das Ziel österreichischer F&E-Tätigkeiten muss es daher sein, Effizienztechnologien zu schaffen, die grundsätzlich in der Lage sind, den Endenergiebedarf in HLK-Anwendungen substantiell zu senken. Der im Projekt adressierte Bereich der Lüftungstechnik gewinnt zunehmend an Bedeutung und wird zukünftig eine Schlüsselrolle in HLK-Anwendungen einnehmen. Ausschlaggebend dafür sind gesetzliche Rahmenbedingungen (Schlagwort: EU Gebäuderichtlinie) die einen klaren Trend zum „Near-Zero-Energy-Building“ bei Neubauten als auch im Gebäudebestand vorgeben. Bei der Realisierung derartiger Gebäude spielt wegen der notwendigen Gebäudedichtheit eine aktive, kontrollierte Wohnraumlüftung mit integrierter Wärme- und Feuchterückgewinnung eine entscheidende Rolle. Dies trifft sowohl auf Ein- und Mehrfamilienhäuser als auch auf großvolumige Gebäude (z.B. Bürogebäude, gewerbliche sowie öffentliche Gebäude wie Krankenhäuser, Schulen, etc.) und Betriebsstätten (z.B. Fertigungs- und Produktionshallen) zu.

Ein wesentliches Ziel des Projekts bestand darin, die Performance von ionischen Flüssigkeiten für eine Anwendung in Liquid Desiccant Systemen experimentell, durch detaillierte Simulationen des Absorptionsvorgangs, sowie durch Systemsimulationen zu ermitteln. Basierend auf den durchgeführten Performanceuntersuchungen wurde schlussendlich das technische und wirtschaftliche Potential von Liquid Desiccant Systemen zur Entfeuchtung mit ionischen Flüssigkeiten beurteilt.

Um die ambitionierten Ziele im Projekt zu erreichen, wurden verschiedene Methoden herangezogen. Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt auf den experimentellen Arbeiten, die an mehreren Versuchsanlagen durchgeführt wurden. Bei den experimentellen Arbeiten wurden zwei verschiedene Konzepte verfolgt:

- 1.) Der Spray-Absorber Ansatz, bei dem die Lösung der ionischen Flüssigkeit mittels einer Düse über einen Füllkörper verteilt wird, der wiederum mit Luft durchströmt wird.
- 2.) Der Fallfilm-Absorber Ansatz, bei dem die Lösung der ionischen Flüssigkeit über einen Fallfilm fließt, der auf der Rückseite rückgekühlt werden kann. Die Luft überströmt bei diesem Ansatz den vertikalen Fallfilm quer zu dessen Strömungsrichtung in der horizontalen Ebene.

Die Anlagen wurden vom AIT geplant und in den hauseigenen Labors aufgebaut, wo die Durchführung der Experimente und deren Auswertung erfolgten. Unterstützend dazu wurden gängige Simulations- (CFD) und Ingenieurtools (Solid Works) verwendet.

Die von der TU Wien durchgeführten detaillierten Simulationen des Entfeuchtungsvorgangs an einer Fallfilmplatte wurden numerisch in Matlab gelöst und mit den Fallfilm-Absorber Experimenten verglichen. Die Gesamtsystemsimulationen wurden mit Dymola/Modelica, Python und einer kommerziellen Software der Firma Troges durchgeführt.

Insgesamt beinhaltet das Projekt 6 Arbeitspakete deren Zusammenhang in Abbildung 1 dargestellt ist.

Die Hauptaussagen bezüglich des Potentials eines LDEC-Systems wurden innerhalb des Projekts in den Arbeitspaketen 4,5 und 6 gemacht, weshalb im Folgenden die Inhalte und Ergebnisse aus diesen Arbeitspaketen dargestellt werden.

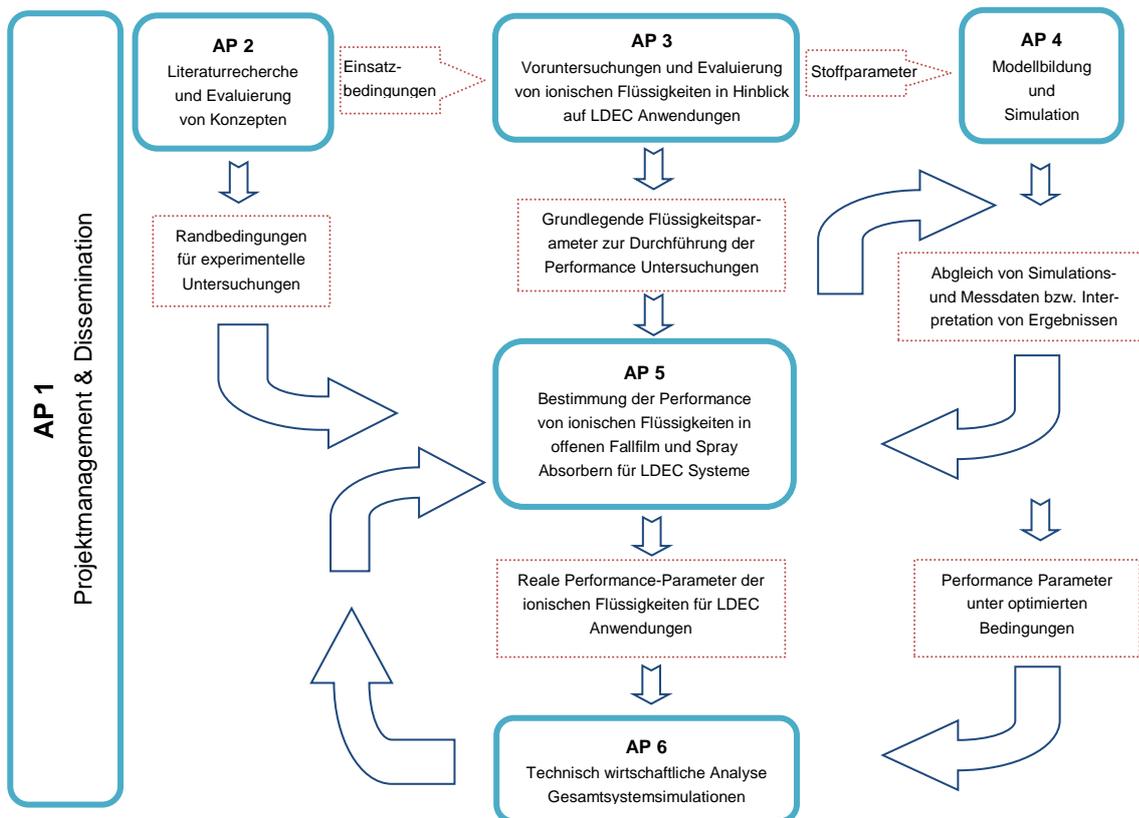


Abbildung 1: Aufbau und Zusammenwirken der einzelnen Arbeitspakete

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Modelbildung und detaillierte Simulationen des Fallfilms

Es wurde die Strömung eines vertikalen Fallfilms, der einer horizontalen Luftströmung tangential zur Filmoberfläche ausgesetzt ist, betrachtet. Im einfachsten Modell wird die Annahme getroffen, dass die Luft und die Filmströmung an der Grenzfläche entkoppeln (freier Schlupf für die Filmströmung und feste Randbedingungen für die Gasströmung). Unter dieser Voraussetzung kann man die Strömung in einem Film konstanter Dicke und die Luftströmung analytisch angeben und sie müssen nicht numerisch simuliert werden. Es wird daher von einer Nusselt-Strömung im Film und von einer Blasius-Grenzschichtströmung in der Luft ausgegangen. Basierend auf diesen vorgegebenen Strömungen wird der Transport von Temperatur und Wasserkonzentration in allen drei Raumrichtungen numerisch simuliert, wobei diese skalaren Felder an der Grenzfläche gekoppelt sind (anders als die Geschwindigkeitsfelder).

Für eine realistischere Näherung wurde in einem weiteren Schritt keine unbegrenzte Atmosphäre betrachtet, sondern eine Kanalströmung zwischen parallelen Platten die beide mit einem Fallfilm benetzt sind (Abbildung 2). Die stationäre Kanalströmung, die sich von der Vorderkante der Platten entwickelt, wurde numerisch berechnet.

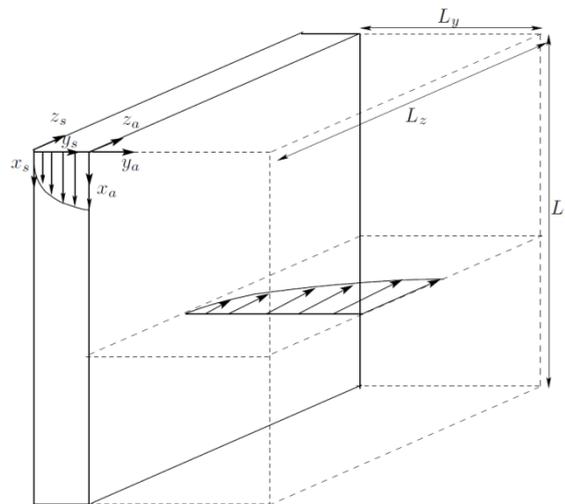


Abbildung 2: Koordinatensystem und Geometrie eines Fallfilm-Absorbers. Aus Symmetriegründen ist nur ein Hälfte des Kanals dargestellt.

Die Berechnungen wurden für das bekannte LiBr-H₂O-System durchgeführt, um den Einfluss der wichtigsten Kontrollparameter auf den Absorptionsprozess systematisch zu erfassen. Darüber hinaus wurden auch numerische Rechnungen für das alternative System mit der ionischen Flüssigkeit CrysCOPlus 2200-H₂O (IL-H₂O) durchgeführt, für welche auch experimentelle Untersuchungen erfolgten. Parametervariationen erfolgten ausgehend von einem Referenzpunkt. Die Referenzpunkte und der Variationsbereich der Parameter sind in Tabelle 1 angegeben. Der Referenzpunkt A bezieht sich auf das System LiBr-H₂O, der Referenzpunkt B auf das System IL-H₂O .

Tabelle 1: Referenzparameter und deren Variationsbereich.

System → ↓ Parameter	A LiBr-H ₂ O	B IL-H ₂ O	Variationsbereich A
L_x	0.7 m	0.7 m	
L_y	0.002 m	0.002 m	[0.001...0.004] m
L_z	0.1 m	0.1 m	[0.075...0.1] m
Γ	0.01 kg/s	0.014144 kg/s	$[8 \times 10^{-4} \dots 10^{-2}]$ kg/s
$T_{s,w}$	28 °C	15.53 °C	isotherm/adiabatisch
$T_{s,in}$	32 °C	17.84 °C	
$C_{s,in}$	54 Gew%	70.93 Gew%	[50...90] Gew%
$W_{a,in}$	1 m/s	1.97 m/s	[0.1...2] m/s
$T_{a,in}$	35 °C	26.28 °C	
$\Phi_{a,in}$	50 %	61.53 %	

Die Temperatur- und Konzentrationsfelder (Wasser) wurden durch numerische Lösung eines gekoppelten Systems linearer Differentialgleichungen mit nichtlinearen Randbedingungen bestimmt. Die numerischen Simulationen wurden mit Hilfe von Matlab durchgeführt.

3.2 Experimente an den offenen Apparaturen

Um die Entfeuchtungsperformance der ionischen Flüssigkeiten untersuchen zu können, wurden zwei Versuchsanlagen (Fallfilm- und Spray-Absorber) konzipiert und aufgebaut.

Spray-Versuchsaufbau

Die Versuche im Spray-Absorber sollten einerseits die Entfeuchtungsperformance der ionischen Flüssigkeit aufzeigen und andererseits sollten verschiedene Füllkörper sowie ein Lamellenwärmetauscher im Einsatz miteinander verglichen werden. Wie Abbildung 3 zeigt, unterscheiden sich die Füllkörper z.B.: in der Struktur, in der Dichte und in der aktiv zur Verfügung stehender Oberfläche. Durch den Lamellenwärmetauscher ergab sich außerdem die Möglichkeit die ionische Flüssigkeit während des Absorptionsprozesses zu temperieren und so den Absorptionsprozess zu beeinflussen.

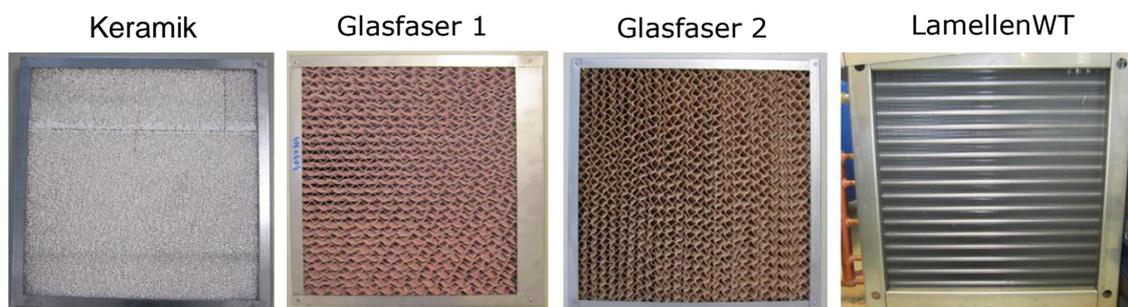


Abbildung 3: Füllkörper die im Spray Versuchsaufbau getestet wurden.

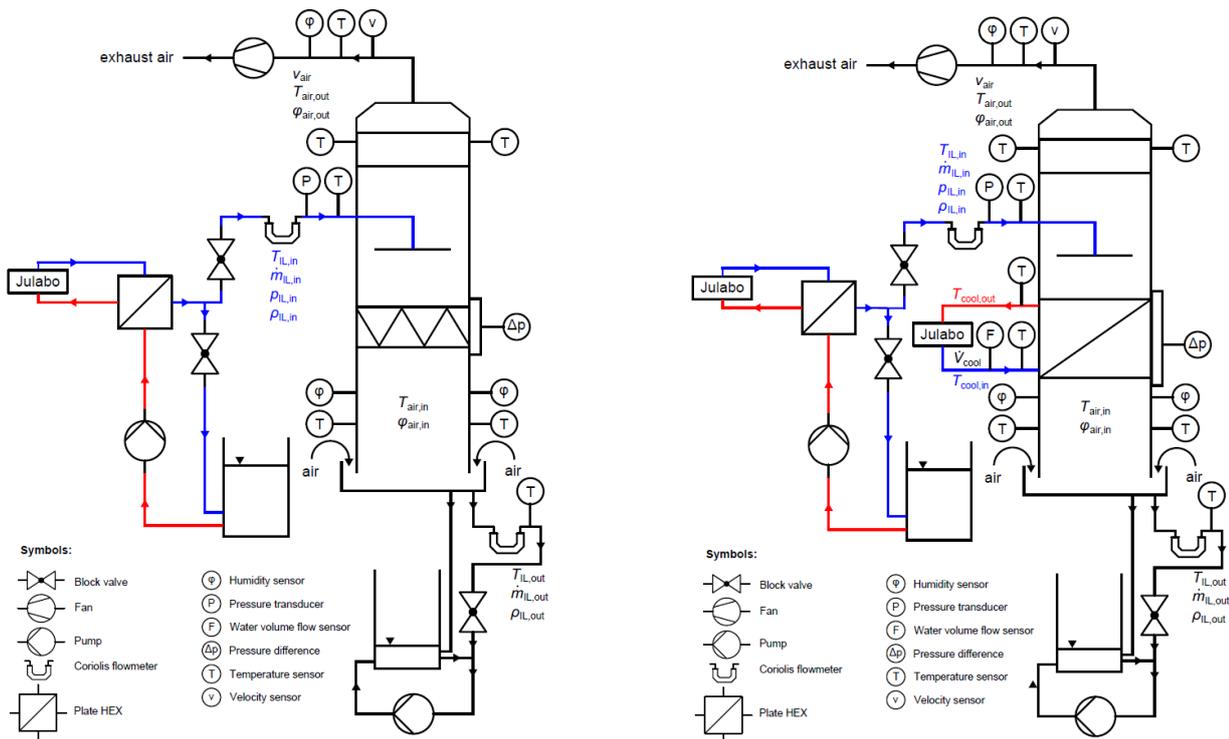


Abbildung 4: Anlagenschemas des Spray-Absorber-Versuchsaufbaus. Links das Schema mit den Füllkörpern Keramik und Glasfaser und rechts mit dem Lamellenwärmetauscher. Im rechten Aufbau wird ein zweites Temperiergerät (Julabo) dazu verwendet den Lamellenwärmetauscher zu kühlen oder aufzuheizen.

Abbildung 4 zeigt das Anlagenschema für den Spray-Absorber-Versuchsaufbau.

Um die Entfeuchtungsrate messen zu können, wurde die relative Feuchtigkeit, die Luftgeschwindigkeit und die Temperatur der Luft mit mehreren Sensoren vor und nach dem Absorber gemessen. Damit ein Mitreißen der ionischen Flüssigkeit durch die Luftströmung nicht stattfindet, wurde zudem ein Tröpfchen-Abscheider am oberen Punkt des Spray-Turms angebracht. Damit sollte der Flüssigkeitsverlust minimiert und die empfindliche Luftgeschwindigkeits-Messsonde, die am Auslass des Luftkanals montiert war, geschützt werden. Zusätzlich zu Messungen an der Luft erfolgte auch die Messung von Temperatur, Massenstrom und Dichte der ionischen Flüssigkeit. Die Messsignale wurden mit einem Multikanalvoltmeter (Agilent) und dem Computerprogramm LabView ausgelesen. Der Aufbau des Spray-Teststandes in der Klimakammer ist in Abbildung 5 (rechts) zu sehen.

Bei der Flüssigkeitszerstäubung musste, aufgrund von Arbeitsmittelverschleppungen in den Vorversuchen, auf Düsen verzichtet werden. Stattdessen wurde eine eigene Konstruktion, die aus Kupferrohren bestand und die Flüssigkeit gleichmäßig über dem Benetzungskörper verteilte, eingesetzt. Der selbstbaute „Tröpfchengenerator“ ist bei Tests mit Wasser in Abbildung 5 (links) zu sehen.

Fallfilm-Versuchsaufbau

Aufgrund der durchgeführten Vorversuche und den detaillierten Simulation des Fallfilms, wurde der Absorber für den Fallfilmabsorber/desorber mit gefrästen Platten bei einem Plattenabstand von 4 mm ausgeführt. Der Zusammenbau der einzelnen Fallfilmpalten zu einem Stapel sowie die Konstruktionszeichnungen sind in Abbildung 6 zu sehen.

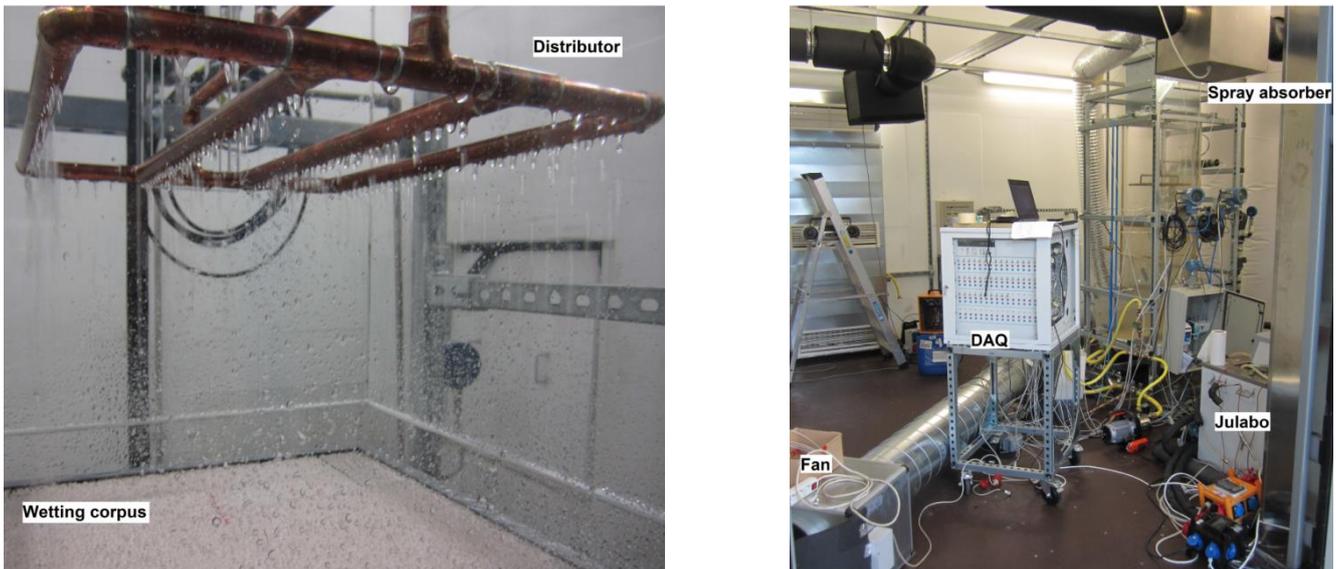


Abbildung 5: (links) Tropfenverteilung im Sprayturm (rechts) Sprayturm Aufbau in der Klimakammer.

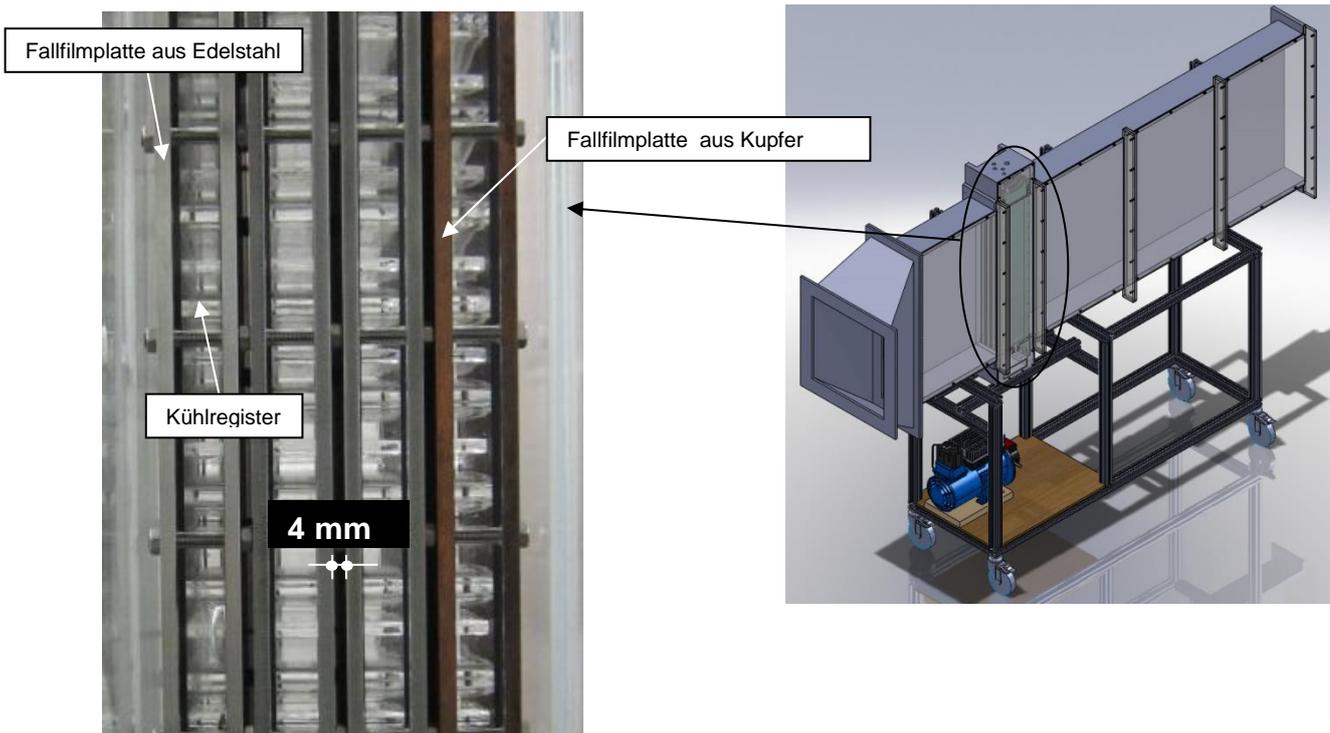


Abbildung 6: Wärmetauscher-Stapel (links) Zwischen den Platten befinden sich die Kühlkanäle für Wasser, die transparent ausgeführt waren. (rechts) Konstruktionszeichnungen für den gesamten Fallfilmversuch.

Die Fallfilmplatten konnten durch einen sekundären Wasserkreislauf rückgekühlt werden. Durch den Einbau von zwei Kupferwärmeplatten konnte zusätzlich der Unterschied von Edelstahl- und Kupferplatten auf den Absorptionsprozess mituntersucht werden.

Wie beim Spray-Absorber wurden die Temperaturen, relativen Feuchten und die Luftgeschwindigkeit gemessen, um die Entfeuchtungsrate bestimmen zu können. Zusätzlich zu den Messungen an Luft erfolgte auch die Messung von Temperatur, Massenstrom und Dichte der ionischen Flüssigkeit, sowie des Kühlwassers. Die Messsignale wurden mit einem Multikanalvoltmeter (Agilent) und dem Computerprogramm LabView ausgelesen.

Eine der größten Herausforderungen beim Fallfilm-Absorber stellte die erforderliche gleichmäßige Verteilung der ionischen Flüssigkeit auf allen 8 Platten dar. Die einheitliche Verteilung der ionischen Flüssigkeit ist deshalb so wichtig, um bei allen Platten eine gleich starke Benetzung zu. Aus diesem Grund wurde ein System gebaut bei dem, durch Druckdifferenzen zwischen Ein- und Ausgang der Flüssigkeit, die erforderliche gleichmäßige Verteilung erreicht wurde. In Abbildung 7 ist der Gesamtaufbau des Fallfilm-Versuchsaufbaus mit dem Verteilersystem für die ionische Flüssigkeit (rechts oben) zu sehen.

Um eine kontinuierliche Regeneration der ionischen Flüssigkeit zu ermöglichen, wurde bei den Fallfilmversuchen ein Kreisprozess mit Hilfe des Spray-Absorbers aufgebaut. In diesem Kreisprozess wurde der ursprüngliche „Spray-Absorber“ als Desorber verwendet um die ionische Flüssigkeit während der Versuche kontinuierlich zu regenerieren. Dadurch konnten stabilere Zustände erreicht werden und schlussendlich mehr Versuchsdurchläufe durchgeführt werden, als dies bei einem separaten Regenerationsprozess möglich gewesen wäre.

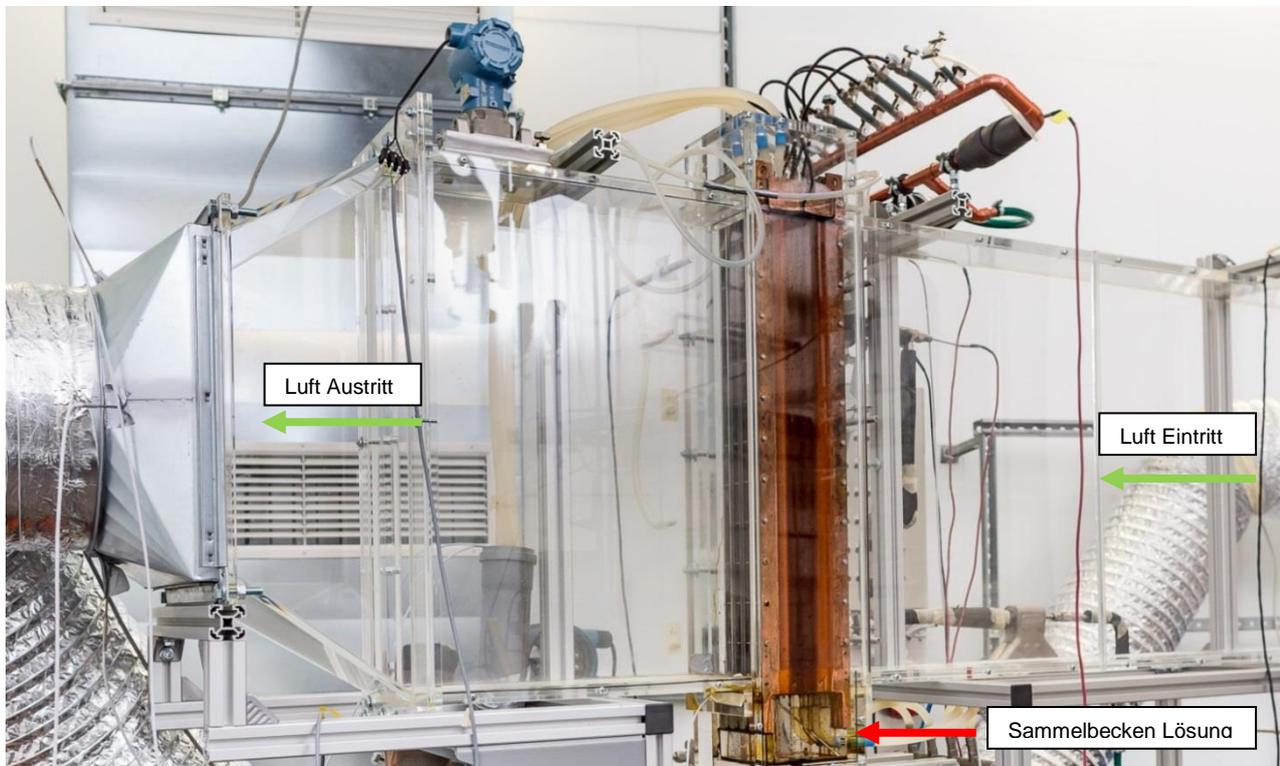


Abbildung 7: Fallfilm-Versuchsaufbau.

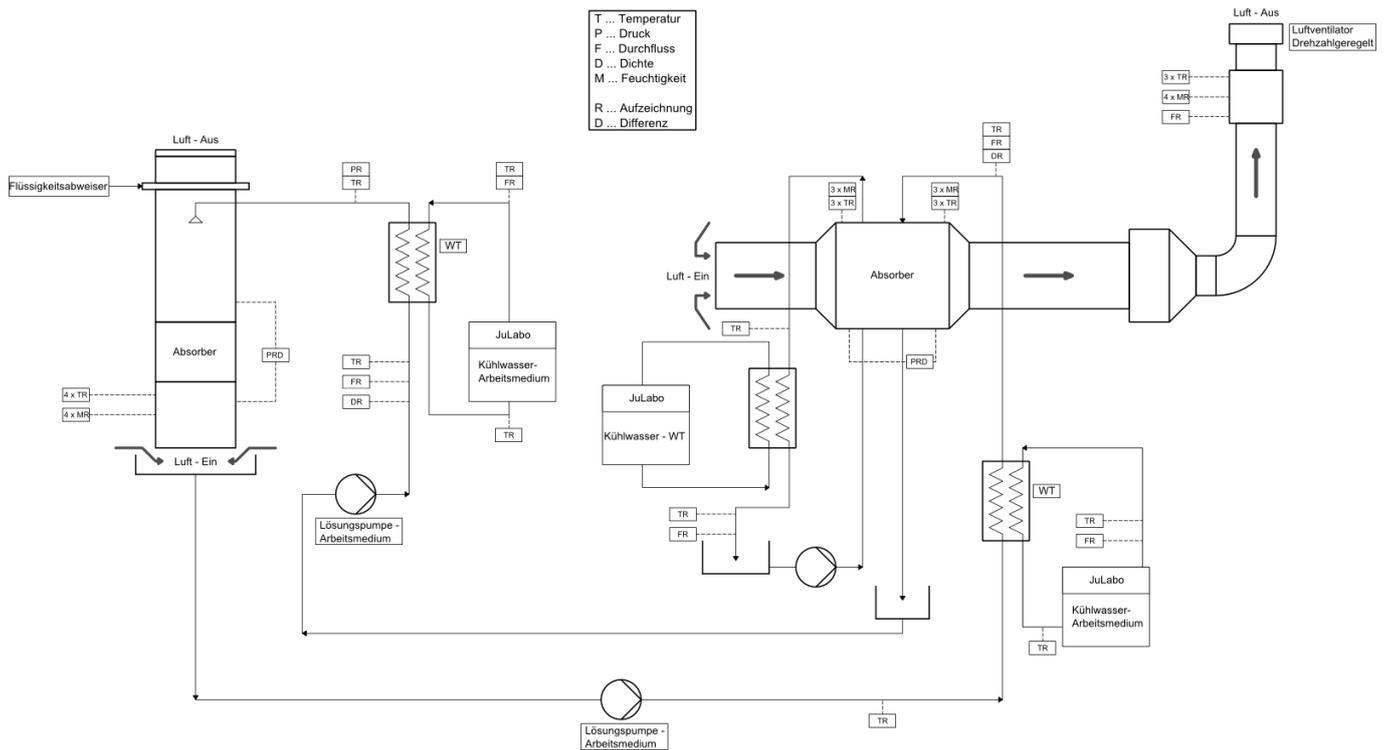


Abbildung 8: Anlagenschema der zusammenschalteten Spray- und Fallfilmanlage.

3.3 Technisch- wirtschaftliche Analyse und Gesamtsystembetrachtungen

Um einen fairen Vergleich mit der bestehenden Technologie zu ermöglichen wurden zu Beginn der Analyse gewisse Rahmenbedingungen vereinbart. So betrug der Luftstrom für das Modellgebäude $15000\text{m}^3/\text{h}$ und der Standort des Gebäudes war in Wien. Eine detaillierte Aufstellung der Rahmenbedingungen ist im Anhang zu finden. Von Troges wurde ein konventionelles System nach den vereinbarten Rahmenbedingungen ausgelegt. Der Energieverbrauch der Kernkomponenten dieses Systems wurde mit der hauseigenen Software berechnet. Im Folgenden wird dieses System als Referenzsystem benannt.

Sowohl für die Wahl der Betriebsparameter bei den Fallfilmversuchen, als auch für die Berechnung des Energieverbrauchs eines LDEC-Systems in der technisch-wirtschaftliche Analyse war die Simulation eines LDEC-Gesamtsystems notwendig. Die kritischen Komponenten, Absorber und Desorber, mussten für eine komplexe Systemsimulation durch möglichst schnelle Modelle realisiert werden, um die Berechnungen in einem angemessenen Rahmen durchzuführen. Da die detaillierten Simulationen der TU Wien auf einem Hochleistungsrechner bereits ca. 4h für die Berechnung einer Komponente benötigen, hätte bei Verwendung dieses Modells, eine Gesamtsystemsimulation für einen Betriebspunkt wahrscheinlich einige Monate benötigt. Aus diesem Grund wurde am AIT ein stark vereinfachtes, aber schnelles, Modell für die Kernkomponenten in Dymola/Modelica programmiert. Dieses Modell beschreibt die Stoff- und Wärmeübergänge über klassische Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten (α, β - Werte). Dadurch konnte die Berechnung einer Komponente auf den Bruchteil einer Sekunde reduziert werden und die Berechnung eines Betriebspunktes des Gesamtsystems konnte in ca. 5 min durchgeführt werden. Das Gesamtsystem wurde in einem stationären Dymola/Modelica – Modell simuliert und mit

Python ausgewertet. Die benötigten Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten wurden für die technisch-wirtschaftliche Analyse direkt aus den Fallfilm-Versuchen bestimmt.

Das am Ende berechnete Gesamtsystem wurde in einem „iterativen“ Prozess über mehrere Monate gefunden. In diesem Prozess wurde ein zu diesem Zeitpunkt plausibles LDEC-System vom AIT durchgerechnet und aufgrund der Ergebnisse und dem Vergleich mit dem Referenzsystem wurden Verbesserungsvorschläge auf Systemebene zwischen AIT und Troges diskutiert. Danach wurde ein verbessertes LDEC-System neu berechnet und erneut besprochen. Insgesamt wurden so drei unterschiedliche LDEC-Systeme berechnet bevor das finale System gefunden wurde.

Die Investitionskosten des LDEC-Systems, als auch die des Referenzsystems, die neben den Energiekosten, ein wichtiger Bestandteil der wirtschaftlichen Analyse sind, wurden von Troges abgeschätzt.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Modelbildung und detaillierte Simulationen des Fallfilms

Abbildung 9 zeigt, dass die stärkste Absorption in der Nähe der Vorderkante des Einlassbereichs der Luft ($z=0$) erfolgt. Desweiteren ist die transferierte Massenstromdichte in der Nähe des Einströmbereichs der flüssigen Lösung des Trocknungsmittels etwas größer als in der Nähe des Auslasses. Um die globalen Transporteigenschaften zu quantifizieren wird die integrale Absorptionsrate als der totale Massenstrom \dot{M} durch die gesamte Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Luft definiert. Die Absorptionseffizienz \dot{M}/\dot{V} wird andererseits als die gesamte transferierte Masse Wasser bezogen auf das zwischen den Platten hindurchgeströmte Luftvolumen, definiert.

Abbildung 10 zeigt die Absorptionsrate \dot{M} (a) sowie die Absorptionseffizienz \dot{M}/\dot{V} (b) als Funktion der Kanalweite für verschiedenen Eintrittsgeschwindigkeiten der Luft. Durchgezogene Linien zeigen die

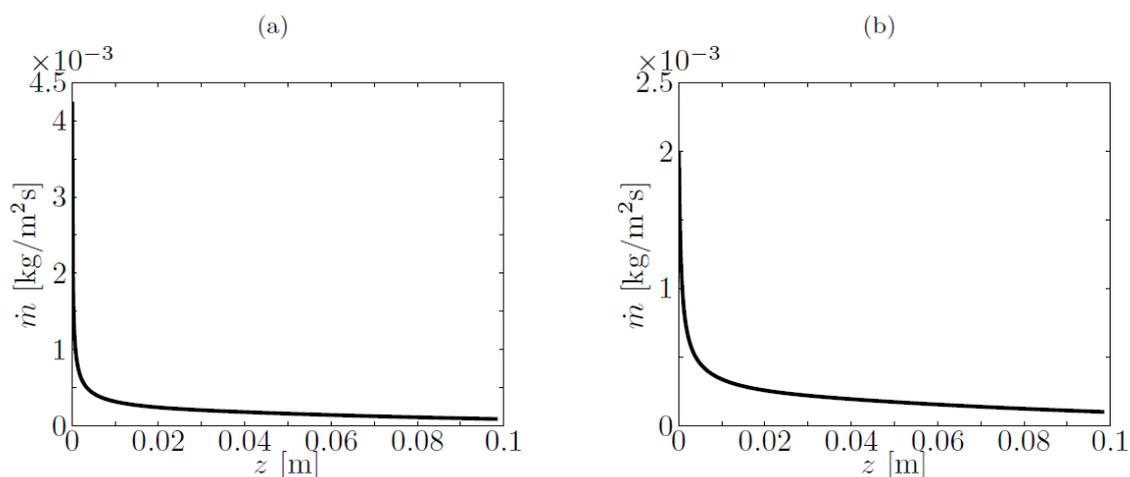


Abbildung 9: Absorbierte Massenstromdichte \dot{m} für Parametersatz A als Funktion von z nahe des Einlasses der Lösung des Trocknungsmittels bei $x=0.001$ m (a) und in der Nähe des Auslasses der Lösung bei $x=0.6805$ m (b)

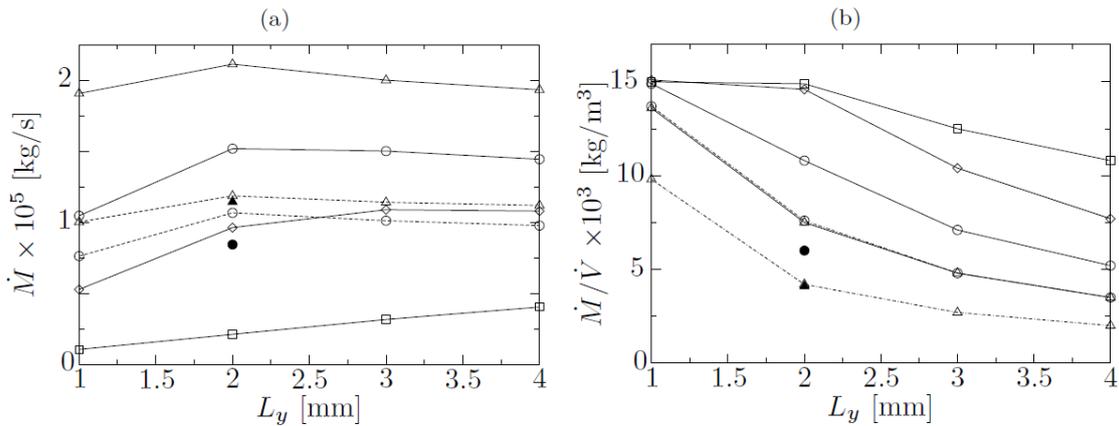


Abbildung 10: Totaler absorbierter Massenstrom \dot{M} (Absorptionsrate) (a) und Absorptionseffizienz \dot{M}/\dot{V} (b) als Funktion der Kanalweite L_y für verschiedene Luft-Einlaßgeschwindigkeiten $W_{a,in}$ □: 0.1\,m/s ◇: 0.5 m/s, ○: 1\,m/s △: 2\,m/s. Durchgezogenen und gestrichelte Linien symbolisieren isotherm gekühlte bzw. adiabatische Wände. Offene und gefüllte Symbole bezeichnen Werte für LiBr-H₂O bzw. CrysCOPlus-H₂O.

Ergebnisse für eine isotherm gekühlte Plattenoberfläche, während gestrichelte Linien die Ergebnisse für eine adiabatisch ungekühlte Wand darstellen, bei ansonsten ungeänderten Parametern. Offenbar erhöht die Plattenkühlung die Absorption. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit erhöht den konvektiven Transport wodurch die Absorptionsrate steigt (Abbildung 10 a). Andererseits zeigt Abbildung 10 b, dass für gegebene Filmdicke eine Erhöhung der Kanalweite bei konstanter Einströmgeschwindigkeit zu einem erhöhten Luftdurchsatz führt ohne aber die Absorption signifikant zu steigern. Dadurch sinkt die Absorptionseffizienz (Abbildung 10 b).

Abbildung 11 a zeigt die Absorptionseffizienz als Funktion Luftgeschwindigkeit am Einlass $W_{a,in}$ für verschiedenen Kanallängen.

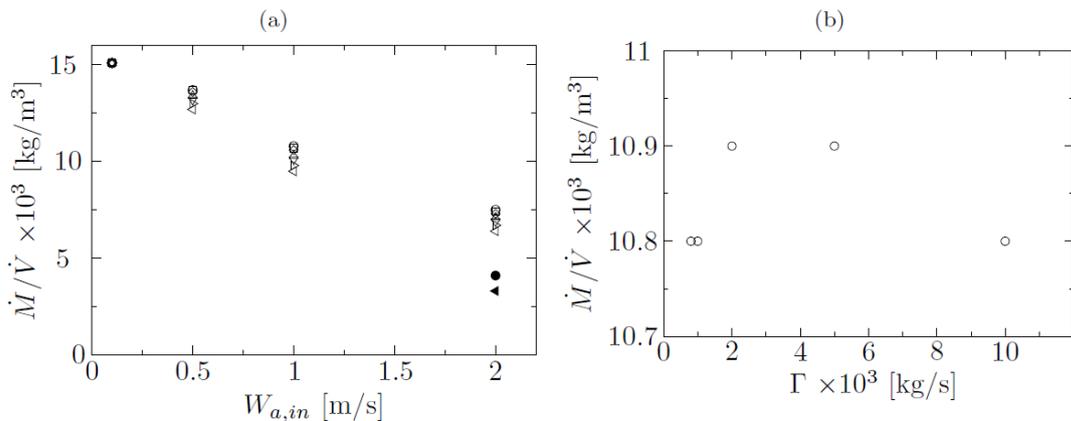


Abbildung 11: Absorptionseffizienz (a) als Funktion der Luft-Einlassgeschwindigkeit $W_{a,in}$ für verschiedene Kanallängen L_z : ○: 100 mm □: 98 mm ◇: 95 mm △: 90\,mm ▽: 85\,mm ▷: 80\,mm ◁: 75\,mm und (b) als Funktion des totalen Massenstroms Γ des flüssigen Films. Offene und gefüllte Symbole bezeichnen LiBr-H₂O bzw. CrysCOPlus-H₂O.

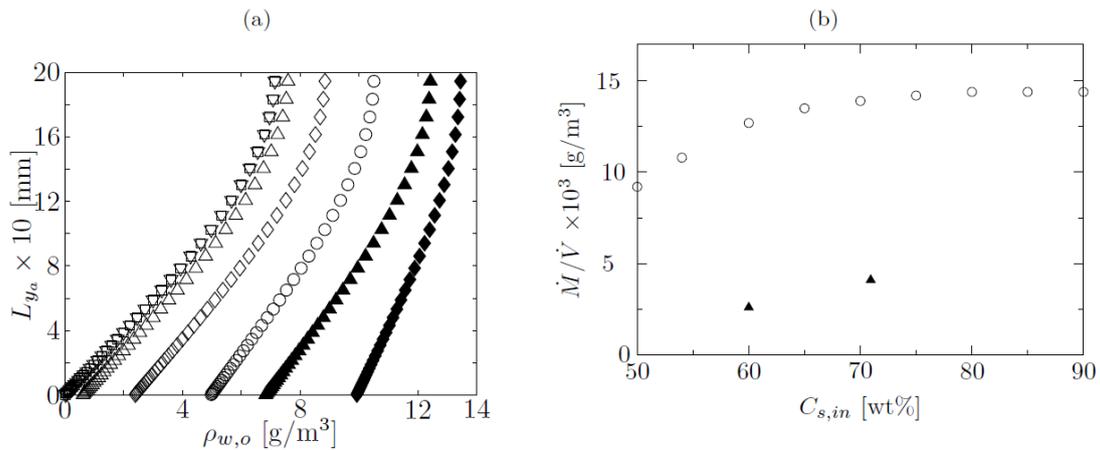


Abbildung 12 (a) Absolute Luftfeuchte am Luftauslass $\rho_{w,o}$ als Funktion der freien Kanalweite $L_{y,a}$: für verschiedene Lösungskonzentrationen am Flüssigkeitseinlass $C_{s,in}$: \circ : 54 wt% \diamond : 60 wt% \triangle : 70 wt% \square : 80 wt% ∇ : 90 wt% und (b) Absorptionseffizienz als Funktion der Konzentration des Trocknungsmittels am Flüssigkeitseinlass. Offene und gefüllte Symbole bezeichnen LiBr-H₂O bzw. CrysCOPlus-H₂O.

Immer, wenn die Verweilzeit der feuchten Luft hinreichend lang ist, so dass die Feuchte genug Zeit zur Diffusion in y -Richtung hat (d.h. bei geringen Luftgeschwindigkeiten $W_{a,in}$), kann die Absorptionseffizienz oberhalb einer gewissen Kanallänge nicht mehr erhöht werden. Falls jedoch nicht genug Zeit für die Feuchtediffusion in y -Richtung zur Verfügung steht (d.h. bei hohen Luftgeschwindigkeiten $W_{a,in}$), muss die Kanallänge erhöht werden, um dieselbe Absorptionseffizienz zu erzielen. Unabhängig davon ist die lokale Absorptionsrate für alle Einlassgeschwindigkeiten unmittelbar an der Vorderkante des Lufteinlasses am höchsten. Daher hat die Kanallänge oberhalb eines gewissen (relativ geringen) Wertes keinen signifikanten Einfluss auf die Absorptionseffizienz. Abbildung 11 b zeigt die Absorptionseffizienz als Funktion des Massenstroms Γ der flüssigen Lösung des Trocknungsmittels. Der eintretende Massenstrom Γ , und damit auch die Filmdicke δ_{Nu} bzw. die Geschwindigkeit des Films u_{Nu} , haben keinen signifikanten Einfluss auf die Absorptionseffizienz.

Abbildung 12 a zeigt den Einfluss der Konzentration der Lösung des Trocknungsmittels am Einlass $C_{s,in}$ auf die absolute Feuchte pro Luftvolumen $\rho_{w,o}$ am Auslaß des Kanals.

Darüber hinaus ist in Abbildung 12 b die Absorptionseffizienz als Funktion der Konzentration der Lösung am Einlass $C_{s,in}$ dargestellt. Man erkennt, dass die Absorption durch eine Erhöhung der Konzentration der Lösung $C_{s,in}$ gesteigert werden kann. Dieser Effekt kann jedoch oberhalb einer gewissen hohen Konzentration des Trocknungsmittels $C_{s,in}$ nicht weiter gesteigert werden, da sich an der Grenzfläche kein weiterer Wasserdampf befindet, der absorbiert werden könnte.

In einem verbesserten Modell wurden die beiden Strömungen (Nusseltfilm in der flüssigen und Grenzschichtströmung in der gasförmigen Phase) mechanisch an der gemeinsamen Grenzfläche gekoppelt, um den Einfluss dieser Kopplung auf die Absorption zu untersuchen.

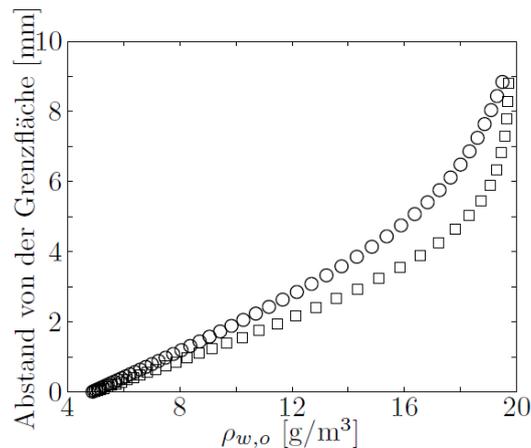


Abbildung 13: Absolute Feuchte am Luftauslass $\rho_{w,o}$ für das System LiBr-H₂O und für gekoppelte (○) und entkoppelte Strömungen (□) an der Grenzfläche.

Zu diesem Zweck wurde angenommen, dass diese Kopplung nicht zu einer Deformation der Grenzfläche führt, die im weiteren als eben angesehen wurde. Abbildung 13 zeigt die absolute Feuchte am Luftauslass $\rho_{w,o}$ für den Fall der mechanischen Kopplung an der Grenzfläche und für ungekoppelte Strömungen. Im Falle der Kopplung resultiert eine Komponente der Luftströmung in x -Richtung. Diese Strömungskomponente führt zu einer erhöhten Absorption, weil die Strömungsrichtung der Luft nun abhängig von dem Abstand von der Platte ist. Da die Strömung in x -Richtung jedoch viel langsamer ist als diejenige in z -Richtung, die man bei größeren Abständen von der Platte findet, ist der Einfluss der Kopplung auf die Absorption nur gering.

4.2 Experimente an den offenen Apparaturen

Spray-Absorber-Versuche

Wie in Abbildung 3 dargestellt, wurden verschiedene Füllkörper im Spray-Versuchsaufbau untersucht. Da bei den ersten Versuchen mit dem Keramikfüllkörper bereits ein für eine spätere Anwendung zu hoher Druckverlust gemessen wurde (welche durch eine erhöhte Leistung der Luftventilatoren kompensiert werden müsste), wurde dieser Füllkörper nicht mehr im Detail untersucht.

Abbildung 14 zeigt die Druckverluste der zwei zu vermessenden Füllkörper in Abhängigkeit der Luftströmungsgeschwindigkeit im Spraykanal.

Der Druckverlust am Lammellenwärmetauscher verursacht einen ca. 10fach höheren Druckverlust im Vergleich zum Glasfaserfüllkörper bei einer Luftströmungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s. Der unerwartet hohe Druckverlust v.a. im Lamellenwärmetauscher entsteht dadurch, dass der nach oben strömenden Luft, die Schwerkraft, der nach unten laufenden Flüssigkeit, kontinuierlich entgegenwirkt. Während der Versuche war dieser Effekt dadurch deutlich zu sehen, dass nach Abschalten des Gebläses (kein Druck entgegen der Schwerkraft der Lösung am Lamellenwärmetauscher) eine erhebliche Menge an Lösung schwallartig aus dem Lamellenwärmetauscher Richtung Bodenwanne fiel.

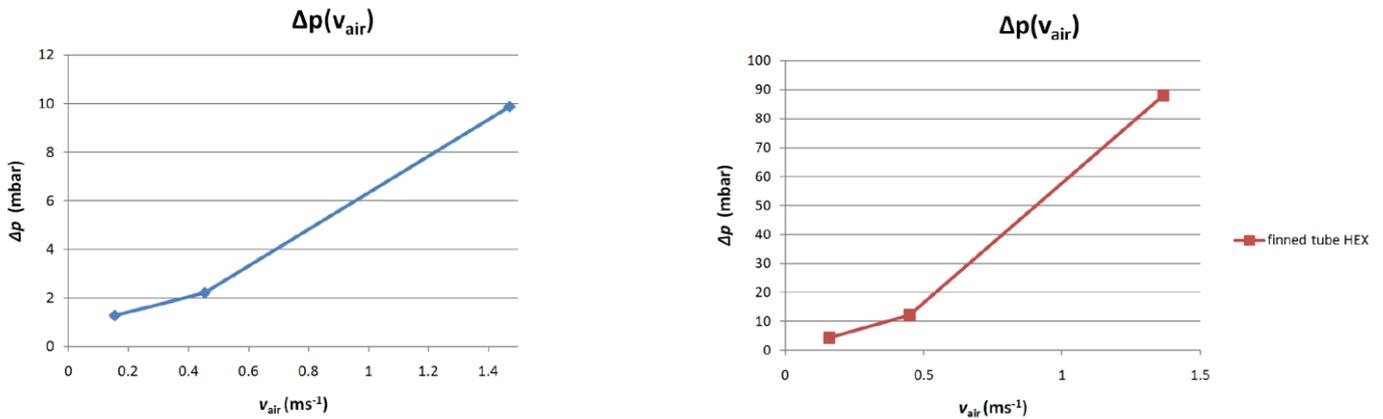


Abbildung 14: Druckverlust der Füllkörper Glasfaser (blau, links) und Lammellenwärmetauscher (rot, rechts) über der Luftströmungsgeschwindigkeit.

Dadurch, dass die Lösung im Glasfaserfüllkörper nicht ausschließlich an der Oberfläche sondern zum Teil durch das Innere der verwobenen Fasern, bzw. aufgrund des größeren Abstands zwischen den Schichten von verwobenen Fasern rinnt, ist dieser Effekt beim Glasfaserfüllkörper weniger ausgeprägt. Aufgrund des hohen Druckverlustes im Spray-Aufbau im Gegenstrombetrieb (Luft strömt entgegen der Schwerkraft, Lösung fließt mit der Schwerkraft) wäre dieses System, entgegen der Literatur, für eine spätere Anwendung nicht zu empfehlen.

Die Versuche mit dem Spray-Absorber zeigten

- eine höhere Effizienz bezogen auf das Luftvolumen bei niedrigen Geschwindigkeiten.
- einen geringen Einfluss der Konzentration auf das Absorptionsverhalten.
- einen deutlichen Einfluss der Lösungstemperatur auf das Absorptionsverhalten.
- einen geringen Einfluss der Lufttemperatur auf das Absorptionsverhalten.

Wie Abbildung 15 zeigt, hängt die Luftentfeuchtung (Absorptionseffizienz) stark von der Luftströmungsgeschwindigkeit und der Temperatur der Lösung (und somit des Dampfdrucks der Lösung) ab.

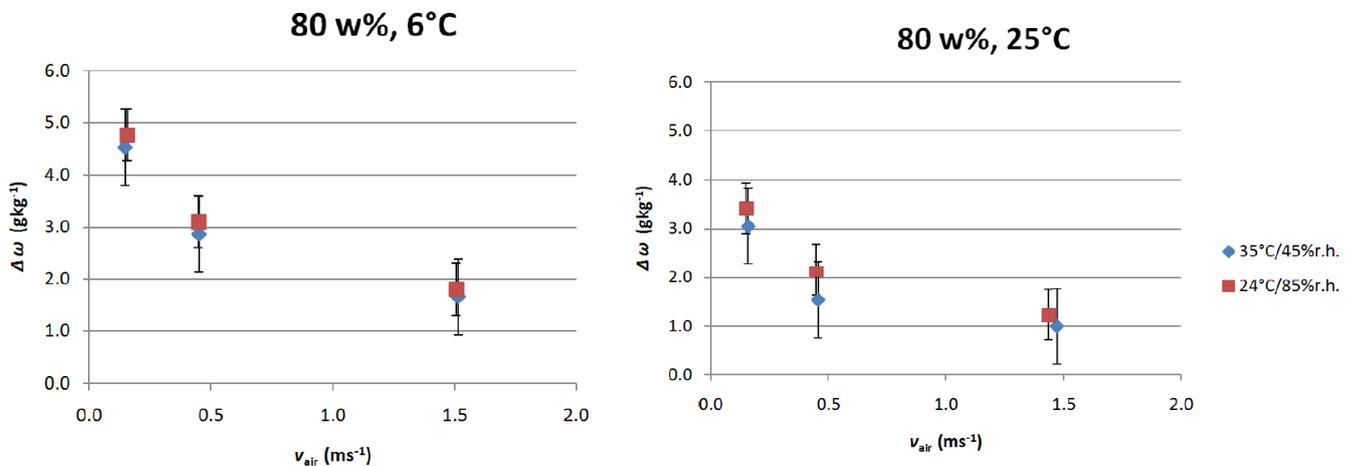


Abbildung 15: Änderung der spezifischen Feuchtigkeit bei gleicher Konzentration (80 w%) aber unterschiedlichen Eingangstemperaturen der ionischen Flüssigkeit mit dem Glasfaserfüllkörper (links) 6°C; (rechts) 25 °C. $\Delta \omega$ bezeichnet den Unterschied der spezifischen Feuchte der Luft zwischen Ein- und Ausgang. \square und \diamond bezeichnen verschiedene Luftzustände.

Je langsamer die Luft strömt, desto mehr Zeit steht zur Verfügung damit Wasser aus der Luft durch die ionische Flüssigkeit absorbiert werden kann. Die maximale erreichte Entfeuchtung beträgt $4,76 \pm 0,48$ g/kg bei der 6°C warmen Lösung und bei einer Luftgeschwindigkeit von $0,15 \text{ ms}^{-1}$. Bei allen Luftgeschwindigkeiten erhöht die aktive Vorkühlung der Lösung (6°C) die Absorptionseffizienz um ca. 1 g/kg. Vergleicht man die Absorptionseffizienzen bei verschiedenen Lufttemperaturen (und gleichen absoluten Feuchten) erkennt man, dass der Einfluss der Lufttemperatur auf die Absorptionseffizienz im Bereich von ca. 0,2 g/kg liegt (rote Quadrate und blaue Karos in Abbildung 15).

Um eine Erhöhung der Absorptionseffizienz beim Sprayabsorber zu erreichen, könnten in Zukunft folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Veränderung der Geometrie des Füllkörpers um eine größere Oberfläche zu erreichen
- Bessere Verteilung der Flüssigkeit über den Füllkörper.

Zudem sollte in einer realen Anwendung eine Anpassung der Luftströmung zur Minimierung der Druckverluste durchgeführt werden.

Fallfilmabsorber-Versuche

Bei den Fallfilmabsorber-Experimenten wurden hauptsächlich zwei Ziele verfolgt. Erstens, die Verifikation der Simulationen mit der TU Wien und zweitens, durch Versuche an systemnahen Bedingungen, das AIT-Simulationsmodell für die Systemsimulationen zu kalibrieren. Ausgewählte Ergebnisse der Experimente sind in Tabelle 2 und die dazugehörige Beschreibung der Messgrößen in Abbildung 16 zu sehen. Da im detaillierte Modell der TU Wien eine isotherme Wand (perfekte Rückkühlung) vorausgesetzt wurde, wurden die Fallfilmpalten bei den Versuchen mit einem möglichst hohen Massenstrom (ca. 50 kg/min) rückgekühlt. Der mittlere Temperaturunterschied, der in Tabelle 2 dargestellten Experimente zwischen dem Wassereintritt (ϑ'_c) und dem Wasseraustritt (ϑ''_c), betrug 0,66 K. Für die vergleichenden Simulationen der TU Wien wurden immer die Wassereintrittstemperaturen (ϑ'_c) als isotherme Temperatur verwendet. Zudem haben die beiden äußeren Luftkanäle keinen Fallfilm an der gegenüberliegenden Seite, weshalb ein „totes Luftvolumen“, das zwar zum Volumenstrom, aber nicht zur Entfeuchtung beiträgt, berücksichtigt werden muss. Aus diesen Gründen müssen die Simulationen die tatsächliche Absorptions/Desorptionseffizienz leicht überschätzen. Diese Tendenz spiegelt sich auch im Vergleich zwischen Experiment und Simulation wieder. So ist in allen Absorptionsversuchen die spezifische Feuchte (x''_{air}) bei den Simulationen stets etwas geringer, während es bei den Desorptionsversuchen stets etwas höher als beim Experiment ausfällt. Bei allen Versuchen weicht die absolute Feuchtigkeit (x) von den Simulationen im Mittel um ca. 0,28 g/kg ab, wobei die Tendenz der Abweichung immer durch die schon oben beschriebene Annahme der isothermen Wand vorgegeben ist. Die Lufttemperaturen weichen im Mittel um 0,34 K ab. Die Ausgangstemperaturen der Lösung (ϑ''_s) weichen deutlich stärker zwischen Experiment und Simulation ab. Diese Abweichung kann aber dadurch erklärt werden, dass die Lösungstemperatur im Experiment am Ausgang eines Sammelbeckens unterhalb der Fallfilmpalten gemessen wurde (vergleiche mit Abbildung 7). Dieses Sammelbecken steht im thermischen Kontakt zur Temperatur der Klimakammer (ϑ'_{air}). Je nachdem ob die Klimakammer kühler oder wärmer als die Lösungsausgangstemperatur war, ist die gemessene Temperatur der Lösung im Sammelbecken kühler oder wärmer als die durch die Simulation gefundene Temperatur.

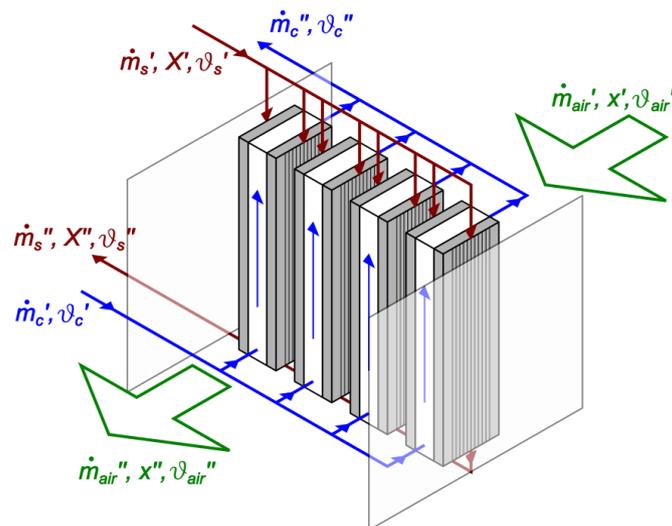


Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Fallfilmexperiments. Die Luft strömt im Kreuzstrom quer zur Strömungsrichtung der Lösung (rot) und der Wasserkühlung (blau) über die 8 strukturierten Fallfilmplatten (grau schraffiert). Jeweils 2 Fallfilmplatten werden durch einen Kühlkanal rückgekühlt. Die dargestellten Messgrößen korrelieren mit der Beschriftung in Tabelle 2.

Diese zusammenhängende Abweichung könnte daher ein Indikator dafür sein, dass es über das Sammelbecken einen nicht zu vernachlässigenden thermischen Energieeintrag während der Experimente gegeben hat.

Die Ergebnisse aus den Experimenten bestätigen die durch die Simulationen gefundenen Erkenntnisse.

Die Absorber- und Desorberkomponenten für die Systemanalyse wurden, basierend auf den Ergebnissen der Fallfilmversuche, hochskaliert. Schlussendlich bestanden die „System“-Absorber bzw. Desorber im Vergleich zum Experiment nicht aus 8 Fallfilmplatten sondern aus 1489 parallel aufgebauten Fallfilmplatten (745 Doppelplatten) um dem hohen Volumenstrom des Systems Rechnung zu tragen.

Neue Energien 2020 - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 2: Messergebnisse von ausgewählten Experimente am Fallfilm-Absorber und Vergleich mit den detaillierten Simulationen der TU Wien. Versuche ID 21-24 sind Versuche in der Nähe von möglichst wahrscheinlichen Betriebspunkten in Wien. Versuch 21 und Versuch 22 sind hierbei Desorptionsversuche (*). Versuch 3 und 4 zeigt den Unterschied zwischen verschiedenen Luftgeschwindigkeiten. Bei Versuch 8 und Versuch 14 wurde im Vergleich zu Versuch 4 die Eingangskonzentration der Lösung verändert. Beim Vergleich dieser Versuche ist zu beachten, dass auch die Eingangsfeuchten unterschiedlich sind. Versuche 1 und 2 wurden ohne Rückkühlung durchgeführt und die Simulationen 23a und 23b zeigen den Einfluss einer Änderung der Plattengeometrie im Vergleich zu Versuch 23.

ID	Inlet conditions												Simulations TU Wien						Experiments AIT					
	h (m)	l (m)	v'_{air} (m/s)	\dot{m}'_{air} (g/s)	ϑ'_{air} (°C)	x'_{air} (g/kg)	φ'_{air} (%)	\dot{m}'_{air} (g/s)	ϑ'_s (°C)	X' (kg/kg)	\dot{m}_c (g/s)	ϑ'_c (°C)	ϑ''_{air} (°C)	x''_{air} (g/kg)	φ''_{air} (%)	ϑ''_s (°C)	X'' (kg/kg)	ϑ''_{air} (°C)	x''_{air} (g/kg)	φ''_{air} (%)	ϑ''_s (°C)	X'' (kg/kg)	ϑ''_c (°C)	
21*	0.7	0.1	1.97	32.05	25.93	9.84	44.29	13.87	33.7	0.7075	208.9	36.91	-	-	-	-	-	30.23	12.56	46.47	34.43	0.712	36.15	
22*	0.7	0.1	2	32.00	31.22	11.95	41.8	14.04	33.88	0.7062	208.1	37.3	34.01	14.89	44.64	36.73	0.7133	33.55	14.31	43.75	35.55	0.711	36.68	
23	0.7	0.1	1.97	32.00	26.28	13.23	61.53	14.14	17.84	0.7093	208.1	15.53	22.11	10.00	60.15	17.93	0.7077	22.30	10.23	60.67	19.95	0.702	16.17	
24	0.7	0.1	1.97	32.54	22.07	9.81	59.05	14.11	18.63	0.7093	207.8	15.58	19.68	7.95	55.64	16.84	0.709	19.88	8.15	56.27	18.17	0.705	16.01	
3	0.7	0.1	1.02	18.24	35.34	16.85	46.43	14.04	15.97	0.723	209.7	16.86	25.07	11.11	55.28	18.60	0.7203	25.15	11.35	56.59	20.44	71.50	17.62	
4	0.7	0.1	1.99	35.47	35.37	16.64	45.8	14.07	16.17	0.723	209.7	17.99	28.01	12.03	50.27	20.00	0.7139	28.75	12.44	50.11	22.66	71.20	18.86	
8	0.7	0.1	1.94	31.07	30.73	14.44	51.75	14.07	15.98	0.679	209.7	17.16	25.40	10.92	53.29	20.00	0.6774	25.56	11.20	54.54	21.99	67.17	17.82	
14	0.7	0.1	2.01	32.33	30.3	13.57	49.93	13.94	16.93	0.8	208.9	17.13	25.20	10.09	49.89	18.49	0.7969	25.37	10.21	50.36	20.92	79.23	17.68	
1	0.7	0.1	0.99	15.71	35.4	16.99	46.66	13.98	15.88	0.718	0.0	-	28.00	12.84	53.62	30.97	0.7173	28.33	13.06	53.86	31.17	0.714	-	
2	0.7	0.1	1.84	29.01	35.4	16.73	45.96	13.04	16.22	0.725	0.0	-	30.19	13.63	50.09	32.00	0.7241	30.57	13.96	50.52	32.58	0.719	-	
23a	0.7	0.07	1.97	32.00	26.28	13.23	61.53	14.14	17.84	0.7093	inf.	15.53	23.01	10.29	58.00	18.26	0.7078							
23b	0.5	0.1	1.97	32.00	26.28	13.23	61.53	14.14	17.84	0.7093	inf.	15.53	22.16	10.01	59.44	18.06	0.7079							

4.3 Technisch- wirtschaftliche Analyse und Gesamtsystembetrachtungen

Im Projekt wurde eine energetische und wirtschaftliche Analyse einer möglichen LDEC-Anlage in Wien im Vergleich zu einem Standard Referenz System zur Luftentfeuchtung durchgeführt. Als Basis für die Wirtschaftlichkeit wurden Rahmenbedingungen definiert, die im Anhang zu finden sind.

Aufgrund der im Anhang beschriebenen Rahmendbedingungen ergeben sich, bei einer Diskretisierung der Außenluftbedingung in Bereiche von 2 K x 1g/kg, 33 Betriebszustände bei denen die Anlage in Wien in Betrieb ist. Diese 33 Betriebszustände wurden in weiterer Folge berechnet. Die diskretisierten Außenluftbedingungen und deren Häufigkeiten sind detailliert in einem Molier-Diagramm in Abbildung 17 zu sehen.

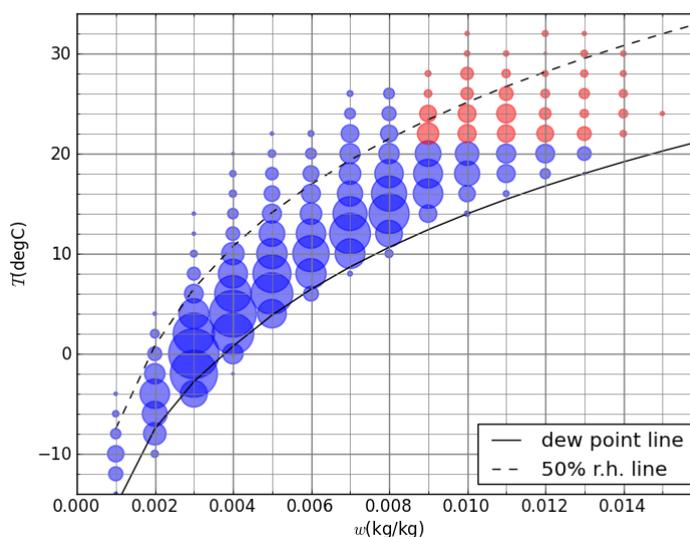


Abbildung 17: Wetterdaten von Wien dargestellt im Molier-Diagramm. Die stündlich aufgezeichneten Wetterdaten wurden in 2 K x 1g/kg - Bereiche unterteilt, wobei der Mittelpunkt des Bereichs als Gitterpunkt dargestellt ist. z.B.: werden im Gitterpunkt (0.013 kg/kg, 30°C) alle Wetterbedingungen zusammengefasst die im Bereich 13 g/kg±0.5g/kg, 30°C±1°C liegen. Die Fläche der Kreise ist dabei direkt proportional zur Häufigkeit der Wetterbedingung/Jahr. Die roten Kreise bezeichnen Wetterbedingungen, bei denen die Luft entfeuchtet werden muss. Bei allen anderen Wetterbedingungen (blaue Kreise) muss die Luft nicht entfeuchtet werden.

Neue Energien 2020 - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

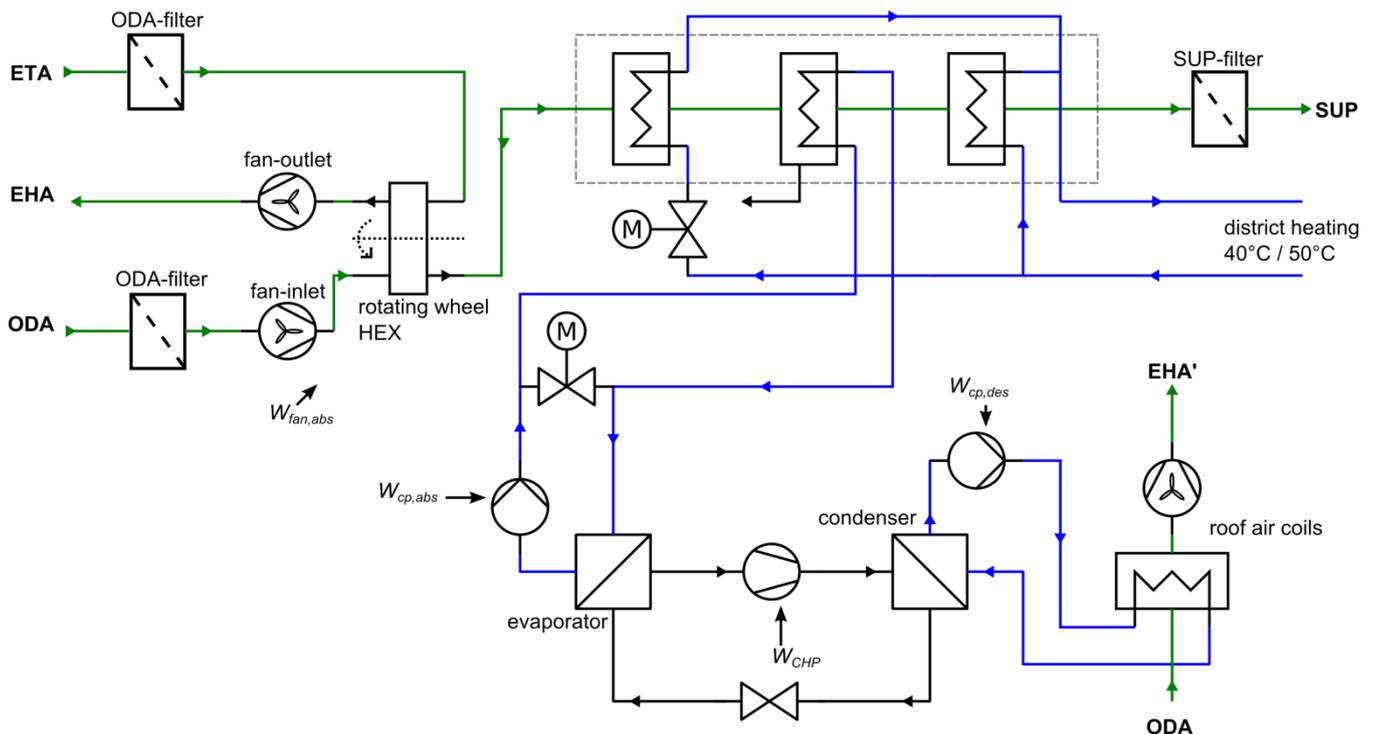


Abbildung 18: Simuliertes Referenzsystem für den Standort Wien. Die Luftführung ist in grün dargestellt und die Wasserführung in blau. Die Außenluft (ODA) wird über den Außenluftfilter vom dahinterliegenden Ventilator angesaugt. Danach wird die Wärme- und Feuchte über einen Rotationswärmetauscher aus der Abluft rückgewonnen, insofern die Temperatur der Außenluft 26°C überschreitet. Die Außenluft wird danach über einen Erhitzer (für den im Projekt nicht untersuchten Winterfall) geführt und erreicht den Luftkühler, an dem die Feuchte kondensiert und abgeführt werden muss (schwarzer Pfeil). Nach der Abkühlung in die Nähe des Taupunkts muss die Luft durch ein Heizregister auf die gewünschte Temperatur gebracht werden. Die Kälte für die Entfeuchtung wird durch eine Wärmepumpe zur Verfügung gestellt, die durch eine externe, drehzahlgeregelte, trockene Kühlung (z.B.: über Dach) rückgekühlt wird. Der Erhitzer wird durch das Fernwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 50°C und einer Rücklauftemperatur von 40°C gespeist.

Das Referenzsystem wurde von Troges mithilfe einer kommerziellen Software zur Dimensionierung und Auslegung von Lüftungsgeräten ausgelegt. Dies ermöglichte die Abschätzung von erzielbaren elektrischen und thermischen Systemeffizienzen sowie die zu erwartenden Komponentenkosten. Das untersuchte Referenzsystem inklusive Systemskizze ist im Detail in Abbildung 18 dargestellt und erklärt.

Im Laufe des Projekts ergaben sich aus Diskussionen und gewonnenen Ergebnissen der Messungen immer mehr mögliche Varianten eines LDEC-Gesamtsystems. Das zum Zeitpunkt der Berichtslegung erfolgsversprechendste System, das auch schlussendlich untersucht wurde, ist im Detail in Abbildung 19 dargestellt und erklärt.

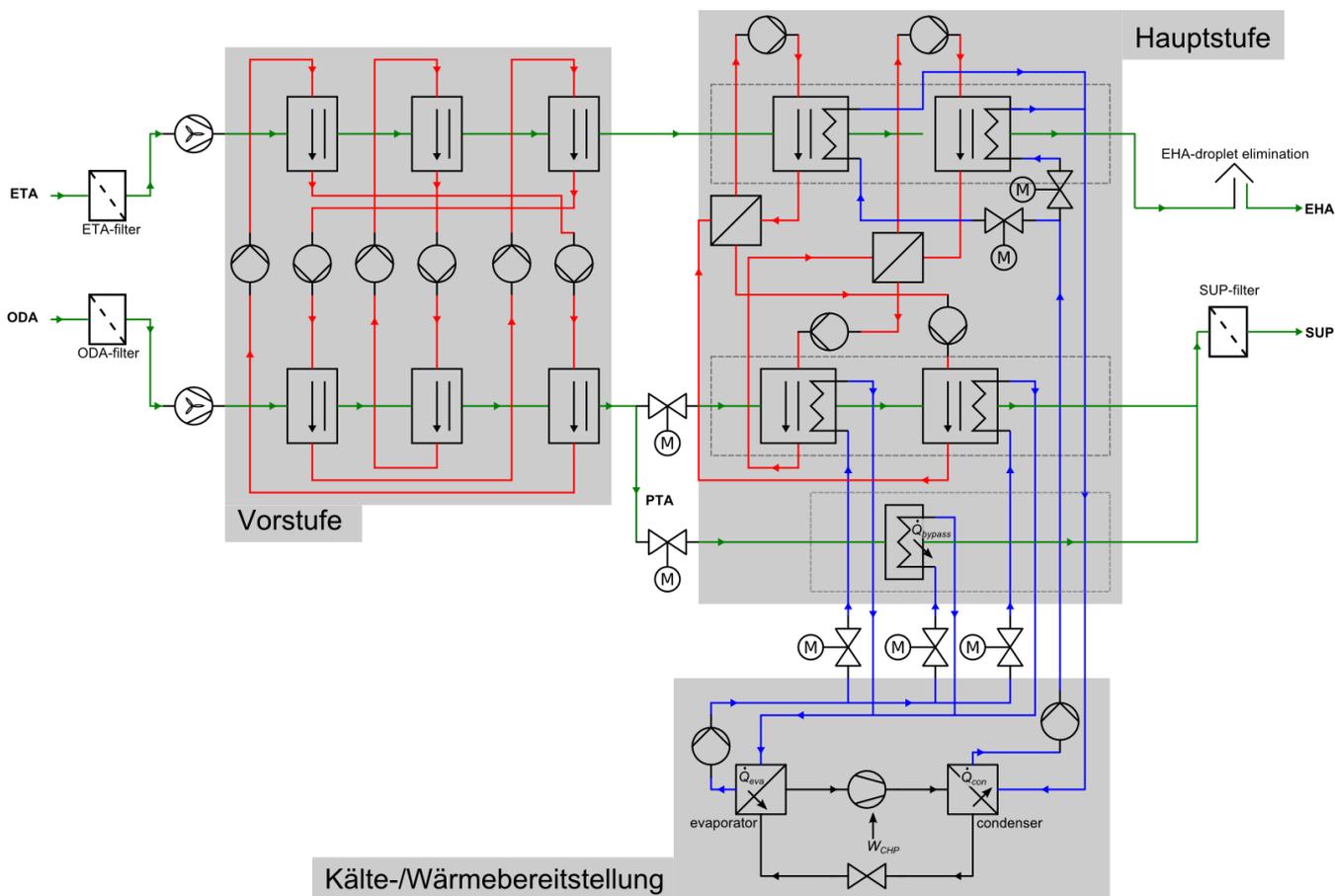


Abbildung 19: Simuliertes LDEC-System zur Luftentfeuchtung für den Standort Wien. Die Luftführung ist in grün dargestellt, die Lösung der ionischen Flüssigkeit in rot und die Wasserführung in blau. Die Außenluft (ODA) strömt über den Außenluftfilter und den Ventilator über die Absorberreihen der Vorstufe und Feuchtigkeit wird aus der Luft in die Lösung absorbiert. Danach (PTA) wird die Luft einerseits zu den mit Wasser rückgekühlten Absorberreihen (oben) und einem Kühlregister (unten) aufgespalten bevor die Luft vor dem Zuluftfilter wieder vermisch wird und in das Gebäude strömt. Die Abluft aus dem Gebäude (ETA) strömt über den Ventilator und die Desorberreihen der Vorstufe zu den mit Wasser aufgeheizten Desorberreihen der Hauptstufe. Bevor die befeuchtete Luft an die Umgebung abgegeben wird, wird die Luft über einen Tropfenabscheider geführt. Die für den Prozess benötigte Kälte und Wärme wird über eine Wärmepumpe bereitgestellt.

Elektrischer Energieverbrauch:

Der gesamte elektrische Energieverbrauch für einen ausgesuchten Betriebspunkt (24°C, 11g/kg, 59 % r.F.) bzw. der gesamte Jahresverbrauch ist in Tabelle 3 bzw. in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 3: Elektrischer Energiebedarf beim Betriebspunkt 24°C, 11g/kg, 59 % r.F. nach Verbraucher aufgeschlüsselt		
Verbraucher	Referenz (kW)	LDEC (kW)
Wärmepumpe	18,2	14,0
Ventilatoren Zu-/Abluft	18,53	14,13
Lösungspumpen	0	2,873
Rotationswärmetauscher	0,11	0
Wasserpumpen	1,11	0,526
Ventilator (Kühlturm)	1,11	0
Gesamt:	39,060	31,529 (81%)

Tabelle 4: Jährlicher elektrischer Energiebedarf nach Verbraucher aufgeschlüsselt

	Referenz (MWh)		LDEC (MWh)	
	Mo-Fr 6-18 Uhr	Mo-So 0-24 Uhr	Mo-Fr 6-18 Uhr	Mo-So 0-24 Uhr
Wärmepumpe	7,371	12,145	5,886	9,605
Ventilatoren Zu-/Abluft	7,473	12,996	5,694	9,905
Lösungspumpen	0	0	1,158	2,014
Rotationswärmetauscher	0,0443	0,0771	0	0
Wasserpumpen	0,481	0,776	0,308	0,475
Ventilator (Kühlturm)	0,696	1,034	0	0
Gesamt:	16,065	27,028	13,046 (81%)	21,999 (81%)

Zusätzlich zum elektrischen Energiebedarf benötigt das Referenzsystem einen jährlichen Fernwärmeenergiebedarf für den Erhitzer von:

Mo-Fr 6-18 Uhr	Mo-So 0-24 Uhr
12,746 MWh	21,746 MWh

Legt man dem Energiebedarf Stromkosten von 15 Cent/kWh und für die Fernwärme 6 Cent/kWh zugrunde so kommt man zu jährlichen Energiekosten von:

	Referenz		LDEC	
	Mo-Fr 6-18 Uhr	Mo-So 0-24 Uhr	Mo-Fr 6-18 Uhr	Mo-So 0-24 Uhr
Strom	2.410,- EUR	4.054,- EUR	1.921,- EUR	3.245,- EUR
Fernwärme	765,- EUR	1.305,- EUR	0	0
Gesamt	3.175,- EUR	5.359,- EUR	1.957,- EUR	3.300,- EUR

Somit ergibt sich im Fall des 24h Betriebs eine jährliche Kosteneinsparung von **2.059,- EUR** für das LDEC-System.

Investitionskosten:

Im Folgenden sollen die Investitionskosten abgeschätzt werden. Dafür wurden die wichtigsten Komponenten in Tabelle 5 aufgelistet. Würde ein LDEC-System bestehend auf dem im Projekt aufgebauten, noch nicht optimierten System, gebaut werden, würde dieses System um bis zu ca. 36.500,- EUR teurer sein. Ein LDEC-System, dass man aufbauend auf den Ergebnissen aus dem Projekt und weiteren Vorarbeiten aufbauen können sollte, ist in Tabelle 5 als LDEC2 System beschrieben. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse im Projekt sollte ein optimierter Aufbau möglich sein, der nur ca. die Hälfte der Absorberfläche und somit nur die Hälfte der ionischen Flüssigkeit benötigen würde. Diese optimierte Version entspricht dem dargestellten LDEC2 System. Das LDEC2 System ist demnach um ca. 14.000,- EUR teurer als das Referenzsystem. Betrachtet man nur den Entfeuchtungsfall im Sommer, wäre der Investitionskostenunterschied beim LDEC2-System nach ca. 7 Jahren wieder eingespart.

Tabelle 5: Investkosten des Referenzsystems, des LDEC-Systems und des LDEC2-Systems

Verbraucher	Referenz (EUR)	LDEC (EUR)	LDEC2 (EUR)
Wärmepumpe (R410A)	34.300,-	34.300,-	34.300,-
Entfeuchtungsanlage (Trog)	80.000,-	105.000,-	100.000,-
Lösungspumpen	0,-	9.500,-	4.750,-
Wasserpumpen	7.177,-	6.714,-	6.714,-
Ionische Flüssigkeit	0,-	10.000,-	5.000,-
Lösungswärmetauscher	0,-	12.500,-	4.900,-
Ventilator (Überdachkühlung)	19.000,-	0,-	0,-
Verrohrung Überdachkühlung	1.000,-	0,-	0,-
Installationsarbeiten	2.000,-	2.000,-	2.000,-
Gesamt:	143.477,-	180.014,-	157.664,-

Vollständigkeitshalber sei an dieser Stelle angemerkt:

- 1.) Im Projekt wurde nur der Sommerfall zur Entfeuchtung untersucht, da eine Ganzjahresbetrachtung den Rahmen des Projekts bei weitem gesprengt hätte. Während das Referenzsystem zur Befeuchtung im Winter nachgerüstet werden müsste, könnte das LDEC-System wie im Projekt dargestellt verwendet werden. Zusätzlich könnte eine weitere Energieeinsparung im Winter aufgrund der Wirkungsweise eines Enthalpietauschers im LDEC-System möglich sein.
- 2.) Da bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung nur der sommerliche Entfeuchtungsfall untersucht wurde, wurde am Anfang der Wirtschaftlichkeitsrechnung, Wasser als Kühlmedium festgelegt. So wurde auch der Rückkühler des Referenzsystems am Dach mit Wasser ausgelegt, obwohl in Wien im Winter die Gefahr bestehen würde, dass das Kühlwasser gefriert. Würde man die Rückkühlanlage des Referenzsystems mit einer Ethylenglykol Mischung von 34% auslegen, wäre er um ca. 3000 EUR teurer.
- 3.) Die Investitionskosten (bzw. auch der Energieverbrauch) der Lösungsmittelpumpen kann aufgrund einer Teilstrom-Prozessführung gesenkt werden. Leider war im Projekt nicht mehr die Zeit, diese Änderung zu untersuchen.
- 4.) Bei den Investitionskosten handelt es sich um Listenpreise. Eine Preisreduktion ist zu erwarten, was den absoluten Preisunterschied zwischen den beiden Systemen weiter minimieren könnte und somit die Amortisationsdauer erniedrigen würde.

5 Ausblick und Empfehlungen

Grundsätzlich wurde im Rahmen des Projekts nachgewiesen, dass eine innovative Luftentfeuchtung mit ionischen Flüssigkeiten möglich ist. Das Fallfilmkonzept für den Absorber bzw. den Desorber stellt aus Sicht des Projektteams die vielversprechendere Lösung, im Vergleich zum Spray-Absorber dar. Gründe

dafür sind einerseits der niedrigere Druckverlust im Kreuzstrom, sowie ein niedrigerer Bedarf an ionischer Flüssigkeit.

Die sehr gute Übereinstimmung der Simulationen der TU Wien mit den Experimenten lässt eine weitere Optimierung des Absorber- und Desorberdesigns zu. Wie in der Wirtschaftlichkeitsanalyse gezeigt wurde, wäre ein nicht-optimiertes System wie es im Rahmen des Projekts aufgebaut wurde aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten nicht konkurrenzfähig. Mit Hilfe von weiteren Optimierungsschritten, die durch die im Projekt gefundenen Erkenntnissen aus Strömungssimulation, Systemsimulation und Experimenten, ermöglicht wurden, können die Investitionskosten deutlich gesenkt werden (LDEC2-Prognose) und das LDEC-System wirtschaftlich machen.

Weitere Herausforderungen für den Erfolg eines zukünftigen LDEC-Systems in Mitteleuropa wären:

1. Ein einfach zu fertigenden Absorberdesigns mit einer evtl. optimierten Benetzung zu finden.
2. Die Performance des LDEC-Systems im Winterfall zu untersuchen.
3. Ein ausgeklügeltes und optimiertes Systemdesign zu entwickeln.
4. Eine optimierte Regelung für das Gesamtsystem zu entwickeln.
5. Eine detaillierte Untersuchung der Vorstufe des LDEC-Systems durchzuführen (Entfeuchtung ohne Rückkühlung)
6. Weitere Anwendungen zu finden (z.B.: Schlamm Trocknung, Supermarkt, etc.)

6 Literaturverzeichnis

7 Anhang

7.1 Rahmenbedingungen für die Gesamtsystemsimulation

Die Zuluft- und Abluftbedingungen wurden von den Projektpartnern folgendermaßen definiert:

- Außenluft (Out Door Air): $22^{\circ}\text{C} < \vartheta_{ODA} \leq 30^{\circ}\text{C}$ (665 Betriebsstunden im Jahr im 24h-Betrieb Wien)
Regelung auf Zuluft (SUPply air): $\vartheta_{SUP} = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{SUP} = 56.54\%$ r.h., $x_{SUP} = 8.261$ g/kg-tr.Luft
Abluft (ExTRACT Air): $\vartheta_{ETA} = 26^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{SUP} = 45\%$ r.h., $x_{SUP} = 9.47$ g/kg-tr.Luft
- Außenluft: $\vartheta_{ODA} > 30^{\circ}\text{C}$ (36 Betriebsstunden im Jahr im 24h-Betrieb Wien)
Regelung auf Zuluft: $\vartheta_{SUP} = \vartheta_{ODA} - 10$ K, φ_{SUP} entsprechende der Feuchtigkeit von ($\vartheta_{ODA} - 8$ K, $\varphi = 50\%$), x_{SUP} entsprechende der Feuchtigkeit von ($\vartheta_{ODA} - 8$ K, $\varphi = 50\%$).
Abluft (ExTRACT Air): $\vartheta_{ETA} = \vartheta_{ODA} - 4$ K, $x_{ETA} = x_{SUP} + 2.88$ g/kg-tr.Luft

Als Basis für die Gesamtsystemsimulation in AP6 wurden folgende Rahmenbedingungen definiert:

- Der Standort der Anlage ist Wien.
- Die Luftgeschwindigkeit an den Absorber-/Desorberplatten ist 2 m/s, wenn der Bypass im Zuluftstrom geschlossen ist.
- Es werden zwei unterschiedlich Szenarien untersucht:

- Betriebszeit ist Mo-So von 0-24 Uhr
- Betriebszeit ist Mo-Fr von 6-18 Uhr
- Die Maschine schaltet sich ein sobald die Temperatur über 22°C und die relative Feuchtigkeit der abgekühlten Luft bei 22°C höher als 50 %r.F. wäre.
- Der Luftvolumenstrom beträgt 15 000 m³/h
- Der Temperaturunterschied zwischen Ein- und Ausgang der Wärmepumpenheizkreisläufe (Vor- und Rücklauf) beträgt 6 K.
- Im Falle des Referenzgerätes beträgt die Temperatur des Vorlaufs 6°C und die des Rücklaufs 12°C, da dies die Standardparameter in der Lüftungstechnik sind.
- Die mittlere Verdampfertemperatur (unteres Temperaturniveau) der Wärmepumpe zur Berechnung des COPs wird als Vorlauftemperatur – 3K angenommen.
- Die mittlere Kondensatortemperatur (oberes Temperaturniveau) der Wärmepumpe zur Berechnung des COPs wird als Vorlauftemperatur + 3K angenommen.
- Die benötigte Vorlauf-Wassertemperatur für den Rückkühler der Wärmepumpe im Referenzsystem wird mit Außenlufttemperatur + 10 K festgelegt.
- Die Carnot-Effizienz der Wärmepumpe wird mit 60% angenommen.
- Der luftseitige Druckverlust aufgrund von Lüftungsleitungen im Gebäude wird bei der Zuluft mit 600 Pa angenommen.
- Der luftseitige Druckverlust aufgrund von Lüftungsleitungen im Gebäude wird bei der Abluft mit 550 Pa angenommen.
- Der Druckverlust des Außenfilters (F7) beträgt 200 Pa im bestäubten Zustand (ODA-filter in Abbildung 18 und 19).
- Der Druckverlust des Zuluftfilters (F9) beträgt 300 Pa im bestäubten Zustand (SUP-filter in Abbildung 18 und 19)
- Der Druckverlust des Abluftfilters (M6) beträgt 200 Pa im bestäubten Zustand (ETA-filter in Abbildung 18 und 19)
- Der Pumpenwirkungsgrad zur Berechnung der elektrischen Leistung der Wasser- und Lösungsmittelpumpen wird mit 35% festgelegt.
- Die Wasserpumpen müssen einen Höhenunterschied von 1 m überwinden.
- Die Flüssigkeitspumpen im LDEC-System, müssen nebst den Druckverlusten von Wärmetauschern usw., einen Höhenunterschied von 2m zum Desorber bzw. 1m zum Absorber überwinden.
- Der Höhenunterschied zu den am Dach untergebrachten Rückkühlanlagen beträgt 5m.
- Der Rückkühlung über Dach ist trocken ausgeführt (Kein Nass-Kühlturm)
- Als Kältemittel für alle Wärmetauscher wird Wasser angenommen.
- Im Unterschied zu den Experimenten wo die Rückkühlung mit einem hohen Massenstrom (Temperaturspreizung ca. 0.6 K) durchgeführt wurde um die Ergebnisse der TU Wien zu verifizieren (isotherme Wandbedingung), würde in der Realität ein niedrigerer Massenstrom und somit eine höhere Temperaturspreizung (z.B.: 6 K) auftreten. Da das Absorber-Komponenten-Systemmodell aber nur das Experiment nachbilden kann musste es den Absorptionsvorgang ebenfalls mit einem hohen Massenstrom berechnen. Allerdings wurden, um den Energiebedarf

des LDEC-Systems konservativ abzuschätzen, die Absorber/Desorberkomponenten in den Systemrechnungen mit der Höchsttemperatur der Spreizung berechnet. D.h.: Wenn die Wärmepumpe 10°C am Ausgang des Verdampfers liefert, war am Eingang des Verdampfers die Temperatur 16°C. Für die Berechnung der Absorbereffizienz wurden ca. 15.5°C als Wassereintrittstemperatur des Absorbers angenommen, während die Ausgangstemperatur exakt 16°C war. Somit wurde die Absorbereffizienz des LDEC-Systems in den Systemsimulationen immer unterschätzt, da bei einer niedrigeren Temperatur eine bessere Effizienz zu erwarten wäre. Mit anderen Worten, ein reales System sollte zu einer etwas höheren Performance imstande sein.

8 Kontaktdaten



Projektleiter: Johann Emhofer
Energy Department,
AIT Austrian Institute of Technology
Giefinggasse 2, 1210 Wien
johann.emhofer@ait.ac.at



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Hendrik Kuhlmann
Institut für Strömungsmechanik und
Wärmeübertragung, TU Wien
Getreidemarkt 9, 1060 Wien
h.kuhlmann@tuwien.ac.at



Christof Braunegg
Troges Gesellschaft für Trocknungs- und
Wärmetechnik m.b.H.
Puchgasse 3, 1220 Wien
c.braunegg@troges.at