

Thomas Kirmayr

High Tech Membranen zur energiesparenden und hygienischen Raumluftbefeuchtung

F 3073

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0240-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht EER 014/2017/953

HIGH TECH MEMBRANEN ZUR ENERGIESPARENDE UND HYGIENISCHEN RAUMLUFTBEFEUCHTUNG

Durchgeführt im Auftrag des
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
(BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumord-
nung (BBR)

Der Bericht umfasst
94 Seiten Text
11 Tabellen

*Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet*

75 Abbildungen

Thomas Kirmayr

Valley, 7. Dezember 2017

„Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau-
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzei-
chen: 10.08.18.7-15.03)“

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.“ ¶

Abteilungsleiter



Prof. Dr.-Ing.
Gunnar Grün

Gruppenleiter



MBA
Thomas Kirmayr

Kurzfassung

Eine zu geringe Luftfeuchte zählt nachweislich zu den häufigsten Beschwerdegründen hinsichtlich des Raumklimas in Bürogebäuden. Auch im privaten Umfeld treten aufgrund der steigenden Anwendung mechanischer Lüftungsanlagen zur Wärmerückgewinnung die Probleme mit zu trockener Raumluft in den Wintermonaten an. Eine zu niedrige Luftfeuchte erhöht das Risiko von Erkrankungen, da eine Unterversorgung der Schleimhäute die Ansiedlung von Keimen und Viren begünstigt.

Die heute am Markt verfügbaren Lösungen zur Raumluftbefeuchtung sind allesamt mit einem sehr hohen technischen wie auch energetischen Aufwand verbunden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Verbesserung des Raumklimas in einem Flugzeug kamen High-Tech-Membrane aus der Produktgruppe der „Ionomere“ zum Einsatz, welche ein großes Wasserdiffusionspotential zeigen. Aufgrund der Materialeigenschaften erscheint theoretisch sogar eine Befeuchtung bei Umgebungstemperaturen als möglich.

Das Ziel dieser Untersuchung lag demzufolge in der Untersuchung der Verwendbarkeit sowie der Ermittlung der Leistungskennwerte dieser High-Tech-Membranen zur Raumluftbefeuchtung in Gebäuden. Zu diesem Zweck wurden gemeinsam mit den Industriepartnern insgesamt 6 Funktionsmuster für unterschiedliche Einsatzzwecke entwickelt, hergestellt und vermessen.

Als für die technischen Anwendungen am besten geeigneter Vertreter der Gruppe der Ionomere wurde die Membrane VANADion® identifiziert. Zum Vergleich wurden weitere heute verfügbare Membranlösungen mit ähnlichem Leistungspotential herangezogen. Diese bestanden sowohl in gängigen textilbasierten Lösungen (z.B. GORE-Tex®) bzw. Lösungen aus dem Baubereich (z.B. Tyvek®).

In allen durchgeführten Messreihen konnte VANADion® ein sehr hohes Befeuchtungspotential sowie eine sehr gute technische Anwendung in den entwickelten Funktionsmustern nachweisen. Als Ziel wurde eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte um etwa 10 Prozent ausgegeben. Grund dafür ist eine Startbedingung von 20 Prozent relativer Raumluftfeuchte, wie sie in unseren Breiten bei niedrigen Außentemperaturen auftritt und einem Zielwert von 30 Prozent, der das Minimum der als behaglich wahrgenommenen relativen Luftfeuchte bildet.

Zwei Lösungen zum direkten Einbau in den Luftstrom einer mechanischen Lüftungsanlage erreichten jeweils eine Erhöhung von ca. 5-7 Prozent relativer Feuchte, jedoch bei einer sehr geringen wirksamen Übertragungsfläche der Membran. Diese kann leicht durch Verlängerung der Befeuchtungskomponente erhöht werden. Ein weiteres dezentrales Lösungsmuster überzeugte trotz sehr kompakter Bauweise als Aufsatz für einen einreihigen Standardheizkörper durch den Verzicht auf jeglichen technischen Antrieb und zusätzlicher Heizleistung, da es ausschließlich den vom Heizkörper erzeugten Konvektionsstrom so-

wie die dort verfügbare Wärme zur Befeuchtung nutzt. Diese Lösung kann sehr einfach nachgerüstet werden.

Hinsichtlich der Lufthygiene konnte festgestellt werden, dass die Membran einen sicheren Schutz gegen die Übertragung von Belastungen aus dem Befeuchtungswasser in die Luft bildet. Auf der luftseitigen Oberfläche können sich jedoch bei geringer Durchlüftung (z.B. Stillstand ohne Wasserabschluss) und einer sehr langen Verwendung ohne Reinigung oder Austausch der Membran Verunreinigungen bilden. Insgesamt wurden trotz sehr hohen Belastungen in den Testbedingungen nur sehr geringe Mengen an Keimen festgestellt. Wurden bestimmte Wartungszyklen beachtet, konnten keinerlei Keimbelastungen an den Oberflächen nachgewiesen werden. Aufgrund der hohen Säurestabilität der Membran ist eine Reinigung einfach durchführbar. Durch entsprechende zusätzliche keimtötende Beschichtungen der Membranoberfläche könnte die Standzeit ohne Wartung zusätzlich erhöht werden.

Die im Vergleich untersuchten weiteren Membranlösungen aus dem Textil- und Baubereich wiesen im ersten Fall deutliche hygienische Probleme und im zweiten niedrigere Leistungswerte als VANADion® auf.

Insgesamt weisen die untersuchten Lösungen daher ein sehr interessantes Umsetzungspotential für eine industrielle Anwendung auf. Die entwickelten Funktionsmuster belegen die Möglichkeit einer zentralen Verwendung in klassischen Lüftungsanlagen sowie einem dezentralen manuellen Einsatz in Kombination mit einem Heizkörper. Gerade die letzte Variante besticht durch die Einfachheit und Wirkung und könnte in einer industriellen Anwendung noch weiter optimiert werden.

Inhalt

1	Ausgangssituation und Problemstellung	6
1.1	Hintergrund	6
1.2	Problemstellung	7
1.2.1	Normative Verweise und neue Studien	7
1.2.2	Problemursachen	11
1.2.3	Folgen zu geringer Luftfeuchte	13
1.2.4	Technische Problemstellung	15
1.3	Stand von Wissenschaft und Technik	16
1.3.1	Physikalische Befeuchtungsprinzipien	16
1.3.2	Systeme und Anwendungen der Luftbefeuchtung	17
1.3.3	Neue innovative Technologien	23
2	Anforderungen und Ziele	24
3	Ermittlung von Leistungskennwerten	27
3.1	Basiskenngrößen	27
3.2	Entwicklung und Herstellung geeigneter Funktionsmuster	30
3.2.1	Funktionsmuster 1 – Flächig aufgespannte Membrane	30
3.2.2	Funktionsmuster 2 – Prüfkörper für Textil-Membrane	31
3.2.3	Funktionsmuster 3 – Rohrförmiger Prüfkörper zur kontinuierlichen Luftdurchströmung mit DN 110	32
3.2.4	Funktionsmuster 4 - Rohrförmiger Prüfkörper zur kontinuierlichen Luftdurchströmung mit DN 160	33
3.2.5	Funktionsmuster 5	34
3.2.6	Funktionsmuster 6 – Luft zu Luft Befeuchtung	35
3.3	Eingesetzte Messtechnologie	35
3.4	Versuchsaufbauten	41
3.4.1	Emissionsprüfkammer - VCE1000	41
3.4.2	Versuchsaufbau zur zentralen Luftbefeuchtung	43
3.4.3	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Langzeitwirkung sowie des Einflusses unterschiedlicher Wasserqualitäten	45
3.4.4	Versuchsaufbau zur Dezentralen Luftbefeuchtung	45
3.4.5	Versuchsaufbau zur Luft-zu-Luft Befeuchtung	48
3.4.6	Versuchsaufbau zur Beurteilung der Lufthygiene	48
4	Messreihen und Ergebnisse	48
4.1	Orientierende Vorversuche in der Emissionsprüfkammer	48
4.2	Vergleichende Messung textilbasierter Membranmaterialien	50
4.3	Ergebnisse der Befeuchtungsleistung des Funktionsmusters 3 mit VANDion®	52

4.4	Ergebnisse der Untersuchung zur Langzeitwirkung mit Funktionsmuster 4	55
4.5	Untersuchungsergebnisse für die Tyvek®-Membran im Funktionsmuster 4	57
4.6	Messergebnisse der dezentralen Anwendung mit dem Funktionsmuster 5	58
4.7	Messergebnisse der Luft-zu-Luft Befeuchtung	63
4.8	Notwendige Wartungs- und Reinigungszyklen	67
4.8.1	Langzeiteffekte auf die Befeuchtungsleistung mit Variation der Wasserqualität	67
4.9	Untersuchungen zur Lufthygiene	69
4.9.1	Aufgabenstellung	69
4.9.2	Prüfaufbau	69
4.9.3	Prüfmethodik und -durchführung	70
4.9.4	Ergebnisse der Untersuchungen	73
4.9.5	Fazit	79
4.10	Berechnungs- und Simulationsmodell	79
5	Ergebnisinterpretation	86
6	Verwertungsplan	87

1 Ausgangssituation und Problemstellung

1.1 Hintergrund

Einen Großteil unserer Lebenszeit verbringen wir Menschen am Arbeitsplatz. Um Tag für Tag unsere Leistung abrufen zu können, müssen wir uns bei der Arbeit wohlfühlen. Grundvoraussetzung hierfür ist die richtige Arbeitsumgebung. In Zusammenhang mit dieser Thematik haben sich in den vergangenen Jahren Begriffe wie „workplacemanagement“ oder „new ways of work“ gebildet. Darunter versteht man die Erkenntnis, dass die Gestaltung der Arbeitsumgebung einen maßgeblichen Einfluss auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Beschäftigten hat.

Heutzutage ist allgemein bekannt, dass der Zusammenhang zwischen Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz von großer Relevanz ist. Bessere Performance und Effizienz der Mitarbeiter bedeuten eine höhere Produktivität und schließlich mehr Ertrag für die Betriebe. Das angestrebte Ziel der Unternehmen ist eine hohe Behaglichkeit für die Arbeitskräfte unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte zu gewährleisten. Denn Nutzerzufriedenheit steht an der obersten Stelle der Qualitätspyramide von Gebäuden und ist somit Hauptindikator, ob ein Bauvorhaben geglückt ist oder nicht [1-Leindecker 2014, S.5]. Aus diesem Grund werden gegenwärtig nicht ausschließlich energetische Anforderungen an Gebäude gestellt, sondern zunehmend auch an den Nutzerkomfort.

Gesundes Arbeiten im Büro ist eines der Leitziele, welches sich viele Firmen und Organisationen gesetzt haben. Dies ist ein wichtiges Bestreben, denn alleine in Deutschland sind rund 18 Millionen Menschen, also mehr als 40 Prozent aller Erwerbstätigen, an Büroarbeitsplätzen tätig [2-DNB 2016, S.2]. Jeder von ihnen benötigt ein humanes Arbeitsumfeld um optimale Arbeitsergebnisse erzielen zu können. Schlechte Temperatur- und Lüftungsverhältnisse wirken sich negativ auf Wohlbefinden und Gesundheit der Mitarbeiter aus. Kurzfristige Folgeerscheinungen sind die Abnahme von Konzentration, Ermüdungserscheinungen und daraus resultierend, ein Leistungsabfall der Beschäftigten. Langfristig gesehen kann die Zunahme von Erkrankungen auftreten, was eine drastische Erhöhung der Fehlzeiten zur Folge hätte. Als Konsequenz sollte für Unternehmen die Sicherstellung eines angenehmen Raumklimas für die Mitarbeiter, unter Berücksichtigung gesundheitlicher und ökonomischer Aspekte, von besonderem Interesse sein.

Ein entscheidender Einflussfaktor, ob sich Beschäftigte an ihrem Arbeitsplatz wohlfühlen, stellt die thermische Behaglichkeit dar. Als „thermisch behaglich“ wird ein Raumklima mit bestimmter Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und Wärmestrahlung definiert, welches der Nutzer als angenehm empfindet [3-BG ETEM 2014, S.2]. Anders formuliert, die Person wünscht keine Änderung des aktuellen Raumluftzustandes (weder wärmer noch kälter, weder trockener noch feuchter). Die richtigen klimatischen Umgebungsbedingungen

und eine gute Raumluftqualität sind somit grundlegende Faktoren für die Zufriedenheit, Leistungsfähigkeit und Gesundheit am Arbeitsplatz.

Ein Blick in die Fachliteratur zeigt, dass eine Vielzahl der Parameter von thermischem Komfort bereits umfangreich untersucht und wissenschaftlich beleuchtet wurde. In diesem Kontext sind zahlreiche Maßnahmen bekannt, um negativ auftretenden Erscheinungen entgegenzuwirken und vorzubeugen. Obwohl die Luftfeuchte neben Raumtemperatur und Luftgeschwindigkeit eine der repräsentativen Größen für die thermische Behaglichkeit darstellt, spielt diese bei Untersuchungen meist eine untergeordnete Rolle.

Unbestritten ist jedoch die Tatsache, dass sich zu trockene Raumluft negativ auf unser Wohlbefinden bzw. unsere Gesundheit auswirkt und als unbehaglich empfunden wird. Ausgetrocknete Schleimhäute, eine geschwächte Immunabwehr und Erkältungskrankheiten zählen zu den typischen Begleiterscheinungen einer zu trockenen Raumluft. Für Unternehmen können sich die Folgen betriebswirtschaftlich extrem negativ niederschlagen. Trotzdem sind sich die Betriebe der weitreichenden Auswirkungen oftmals nicht bewusst. Die optimale Luftfeuchte wird häufig als „Performance-Faktor“ unterschätzt und sollte deshalb bei der Planung und Gestaltung von behaglichen Arbeitsumgebungen vermehrt in den Fokus gerückt werden.

1.2 Problemstellung

1.2.1 Normative Verweise und neue Studien

Hinsichtlich der Luftfeuchte finden sich in unterschiedlichen Normen Hinweise und Regulierungen. Grundsätzlich betrifft dies vor allem Behaglichkeitsaspekte, so dass die Grenzwerte eher hinweisenden Charakter haben.

Tabelle 1
Grenz- und Richtwerte der relativen Feuchte.

Literatur	Grenzwert	Kommentar
DIN EN 13779	40 – 60 %	Temperaturbezogene Luftfeuchtwerte: Sommer (26 °C), Winter (20 °C)
DIN EN 15251	30 – 50 %	Auslegungskriterium für Be- und Entfeuchtungsanlagen; Raumkomfort: Kategorie A (PPD < 6 %, -0,2 < PMV < +0,2)
DIN EN ISO 7730	30 – 70 %	-
VDI 6022	30 – 65 %	Bei 20 °C Lufttemperatur und Raumkomfort-Kategorie RAL 1; Für Asthmatiker und andere Krankheitsbilder: 45 - 55 %
Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR A3.6) [BAuA 2012]	< 80 %	Bei 20 °C Lufttemperatur; (temperaturbezogene Luftfeuchtwerte), keine Mindestanforderung
Fachinstitut Gebäude-Klima [FGK 2011]	> 40 %	-
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz [BGIA 2007]	> 40 %	-
Hauptverband für gewerbliche Berufsgenossenschaften [HVBG 2007]	30 – 70 %	Im Winter: < 50 %

Jedoch gibt es in jüngster Zeit immer mehr nachweisbare Zusammenhänge zwischen einer ausreichend hohen Luftfeuchtigkeit und der Gesundheit.

Wir Menschen benötigen Luft zum Überleben und sind diesbezüglich stark von unserer Umwelt abhängig. Unzählige Mikroorganismen befinden sich in unserem Lebensraum und der Körper ist pausenlos von Schadstoffen umgeben. Der menschliche Organismus kann die Belastungen der Luftqualität sehr gut ausgleichen und schützt uns vor gesundheitsgefährdenden Krankheitserregern. Die wichtigsten Organe zur Bekämpfung von Verunreinigungen sind die Schleimhäute. In erster Linie erfolgt die Entfernung von inhalierten Mikroorganismen in den oberen Atemwegen durch Husten und Niesen. Die sogenannte „mukoziliäre clearance“ schützt die tieferen Atemwege und entspricht einem dauerhaften Selbstreinigungsprozess der Bronchien.

Die sich in unseren Atemwegen befindliche Schleimhaut besteht überwiegend aus Zellen, welche sich aus dichten Büscheln von Flimmerhärchen (Zilien) zusammensetzen. Schleimproduzierende Becherzellen befinden sich zwischen den ziliotragenden Zellen und erzeugen einen speziellen Schleim. Dieses Fluid setzt sich einerseits aus der oberflächigen, zähen, klebrigen Mucoproteinschicht (Gel) und andererseits aus der darunterliegenden, dünnflüssigen Sol-Schicht zusammen. Auf der klebrigen, dickflüssigen Gel-Schicht werden eingeatmete Schadstoffe gebunden und durch peitschenschlag-ähnliche Bewegungen der Zilien aus Nase, Bronchien und Lunge befördert. Anschließend werden die Mikroorganismen geschluckt oder ausgehustet.

Für den kontinuierlichen Selbstreinigungsmechanismus ist die Wechselwirkung zwischen Zilienschlag und Viskosität der Gel-Schicht der entscheidende Faktor. Durch die Schlagfrequenz der Flimmerhärchen liegt die Strömungsgeschwindigkeit des Schleimfilms in einem Bereich von 7 bis 10 mm/min. Ist die Sol-Schicht nicht flüssig genug oder die Gel-Schicht zu viskos, wird die Transportfähigkeit der Zilien unterbunden [4-Guggenbichler 2007, S.1]. Bild 1 zeigt anhand einer schematischen Darstellung die Wirkungsweise des wichtigsten Reinigungsmechanismus der Bronchien, die mukozilliäre Reinigung.

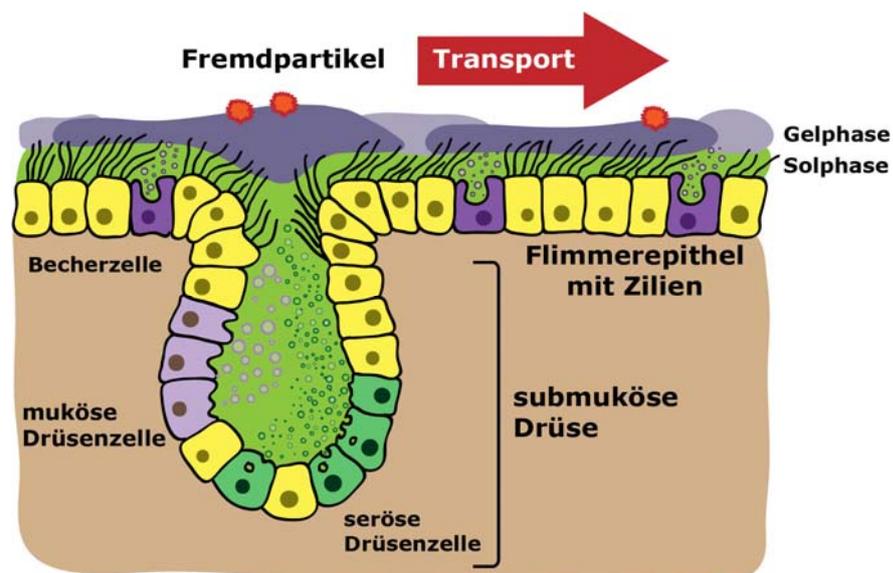


Bild 1:
Funktionschema „Mukozilliäre Clearance“ und Aufbau der Bronchialschleimhaut [5-Tugendheim 2016].

Neueste Forschungsprojekte haben den Einfluss der Raumluftfeuchte auf die Reinigungswirkung der Schleimhaut untersucht. Die Autoren der Studien [4-Guggenbichler, et al.] haben festgestellt, dass zu niedrige Luftfeuchtigkeit gesundheitsgefährdende Austrocknungserscheinungen im Atemtrakt des Menschen hervorruft. Eine durch zu geringe Luftfeuchtigkeit ausgetrocknete Schleimschicht erhöht die Viskosität der Gel-Schicht und als Folge wird die Beweglichkeit der Zilien stark reduziert. Dadurch wird der ganze Selbstreinigungsprozess unterbrochen und die Schleimhäute können ihre Hauptaufgabe, die

Schadstoffrückhaltung aus der Umgebungsluft, nicht mehr ausführen. Aus diesem Grund können Viren, Pilze, Parasiten und andere Schadstoffe leicht in die ausgetrocknete Schleimhaut eindringen und auch länger im Atmungstrakt verbleiben. Die infektiösen Keime können gesundheitsgefährdende Entzündungen auslösen und zu allen Arten von Erkältungskrankheiten, bis hin zur Grippe, führen.

Um die bakterielle Keimbesiedelung zu verhindern und ein effizientes Selbstreinigungssystem aufrecht zu erhalten, ist aus gesundheitlicher Sicht eine relative Luftfeuchtigkeit von mindestens 30 Prozent in Innenräumen notwendig. Bei einer r. F. von 45 Prozent erreicht der Schleimfilm durch die Bewegung der Zilien hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit sein Maximum. Liegt der Wert in einem kritischen Bereich von unter 20 Prozent, so erlahmt die Schlagfrequenz der Zilien vollständig und der Mensch ist den Mikroorganismen in seiner Umwelt schutzlos ausgesetzt [4-Guggenbichler 2007, S.3].

Generell sind die Auswirkungen auf den Menschen bei zu trockener Raumluft vielfältig und es treten häufig folgende Symptome und Beschwerden auf [6-Fitzner 2000, S.7] [7-Gräber 2014, S.4]:

- Trockene Augen bzw. Augenirritationen infolge erhöhter Verdampfung der Tränenflüssigkeit
- Schluckbeschwerden und Halskratzen
- Stimmstörungen, Heiserkeit und Kehlkopfentzündungen
- Geschwächter Schutz der Haut kann zu Hauttrockenheit und Hautjucken führen
- Irritationen der Atemwege und geschwächte Immunabwehr durch ausgetrocknete Schleimhäute
- Infektionskrankheiten und Ansteckungsgefahr mit Influenza A-Virus
- Lungenreizungen und Erkrankungen durch gesundheitsgefährdenden Feinstaub
- Erhöhte elektrostatische Aufladung
- Einschränkungen der Leistungsfähigkeit und Abnahme des Produktivitätsfaktors

Durch die Vielzahl dieser Folgeerscheinungen von zu trockener Luftfeuchte kann von einer Assoziation zum Sick-Building-Syndrom ausgegangen werden. In diesem Zusammenhang beschreibt Bild 2 die Entwicklung biologischer Organismen und die Gegenüberstellung der hygienischen Wirkungsänderungen in Abhängigkeit zur relativen Raumluftfeuchte.

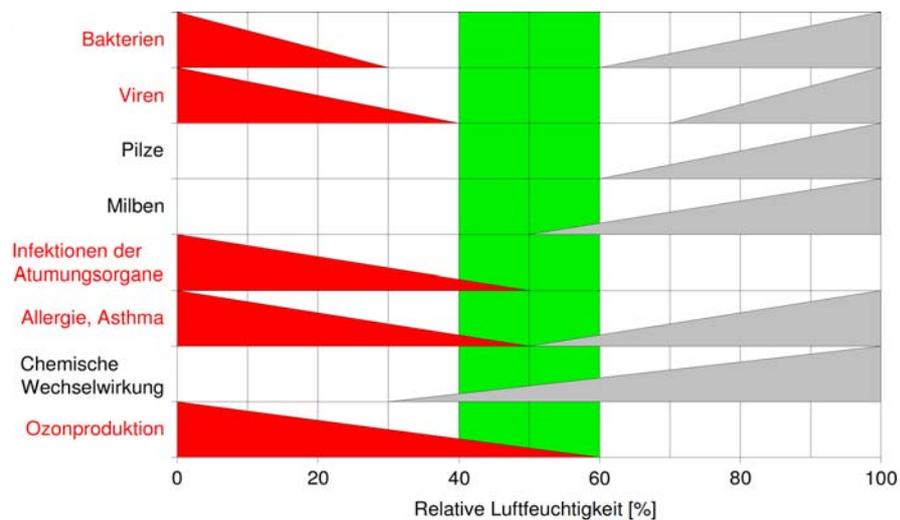


Bild 2:
Raumluftfeuchte und menschlich-biologische Wechselwirkungen
[8-Iselt 1996, S.44 - Eigene Darstellung].

1.2.2 Problemursachen

Aufgrund der geltenden Normen zur Sicherstellung einer ausreichenden Luftqualität sind im Planungsprozess Lüftungsdaten zum Betrieb von mechanischen Lüftungsanlagen zu ermitteln.

Die Gesamtlüftungsrate für einen Raum wird anhand der folgenden Formel berechnet:

$$q_{\text{tot}} = n \cdot q_p + A \cdot q_B \quad (\text{B.1})$$

Dabei ist

- q_{tot} die Gesamtlüftungsrate des Raums, in l/s;
- n der Auslegungswert für die Anzahl der Personen im Raum, -;
- q_p die Lüftungsrate für die Belegung bzw. Nutzung je Person, l/s, pers;
- A die Grundfläche des Raums, m²;
- q_B die auf die Gebäudeemissionen bezogene Lüftungsrate, l/s,m².

Bild 3:
Auszug aus der DIN 15251 2007.

Die DIN 15251 weist hierzu eine Berechnungsformel aus, welche in der Anwendung dazu führt, dass aus der Summe des personen- und emissionsbedingtem Luftwechsels relativ hohe Lüftungsdaten entstehen (Bild 3). Bei kalten Außenbedingungen weist die Luft eine geringe absolute Feuchte auf, d.h. die Luft ist im Verhältnis sehr trocken.

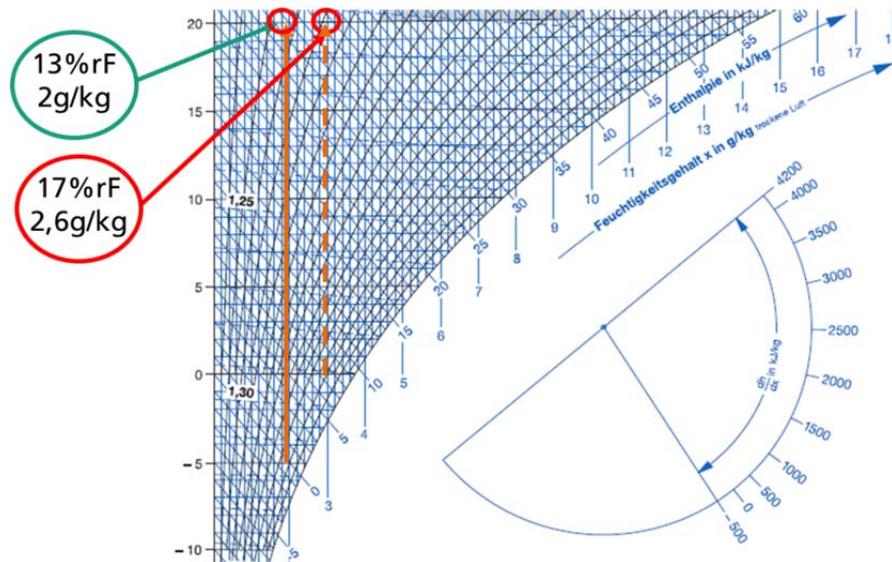


Bild 4:
hx-Diagramm mit Darstellung der kritischen Konstellation für Bürogebäude.

Bild 4 zeigt hierzu ein Beispiel anhand eines hx-Diagramms mit einer Startbedingung der Außenluft mit 0°C und einer relativen Luftfeuchte von 80 Prozent. Diese Luft weist eine absolute Feuchte von 3g/kg auf. Durch die Erwärmung auf eine Raumtemperatur mit 20°C bleibt zwar die absolute Feuchte konstant, die relative Feuchte (rF) sinkt jedoch auf etwa 17 Prozent ab. Im zweiten Beispiel mit einer Startbedingung von -5°C sind es am Ende nur noch etwa 13 Prozent relativer Feuchte. Der Grund für die Differenzierung zwischen absoluter und relativer Feuchte liegt in der Tatsache, dass Luft mit steigender Temperatur in der Lage ist, mehr Wasser aufzunehmen. Für die Behaglichkeitswahrnehmung sowie die Auswirkungen auf die Gesundheit ist jedoch eine ausreichend hohe relative Luftfeuchte erforderlich.

In Bürogebäuden verbinden sich zwei zusätzliche negative Randbedingungen. Zum einen werden die mechanischen Lüftungsanlagen anhand der in Bild 3 dargestellten Formel nach der planerisch zu erwartenden Belegung dimensioniert. In der späteren realen Nutzung sind aufgrund von Urlaub, Krankheit oder Dienstreisen meist deutlich weniger Personen in den Arbeitsbereichen als geplant, so dass die Lüftungsraten im Verhältnis zum Bedarf häufig zu hoch ausfallen und das beschriebene Problem verstärken. Zudem existieren in Bürogebäuden neben den dort arbeitenden Personen kaum Feuchtequellen. Eine erwachsene Person gibt im Winter gerade etwa 35g Wasser je Stunde ab. Um für eine ausreichende relative Luftfeuchte in den aufgeführten Beispielen zu sorgen, müsste die Luft etwa um 1,5-2g/kg an Feuchte gewinnen. Dies bedeutet, dass eine Person etwa 20kg Luft dieser Ausgangsfeuchte je Stunde auf ein behagliches Maß bringen könnte. Dies entspricht etwa einem Luftvolumen von 17m³/h. Beachtet man die Anforderungen der DIN 15251 sind jedoch allein etwa 25m³/h als personenbezogenen Luftwechsel bereit zu stellen. Hinzu kommt noch der emissionsbedingte Luftwechsel in ähnlicher Größenordnung sowie die beschriebene Verschärfung der Problematik aufgrund geringer Belegungsdichten.

All dies sorgt für eine deutlich zu geringe relative Luftfeuchte in den Wintermonaten.

1.2.3 Folgen zu geringer Luftfeuchte

Die Raumluftheuchte ist jedoch ein wichtiger Indikator für ein behagliches Raumklima. Aus gesundheitlicher Sicht leidet unser Körper an den Folgen von zu trockener Raumlufte. Um die Luftfeuchtigkeit direkt zu empfinden, besitzen Menschen kein Sinnesorgan. Wir sind auf sekundäre Empfindungen und auf das subjektive Wohlfühl angewiesen.

Diverse Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Mehrheit der Büroarbeiter durch trockene Luft an deren Arbeitsplatz dauerhaft beeinträchtigt fühlt. 2010 wurden die Ergebnisse einer Umfrage zur Bewertung von Arbeitsbedingungen in Büros von der Hochschule Luzern veröffentlicht. An der „Schweizerischen Befragung in Büros“ (SBiB-Studie) beteiligten sich 116 Betriebe mit insgesamt 1230 Personen. Die Befragung erfolgte mittels online-Fragebogen und umfasste u. a. folgende Themenbereiche: Arbeitsumgebung (Luft, Raumklima, Licht, Lärmpegel, etc.), technische Einrichtungen bzw. deren Beeinflussbarkeit, Anforderungen an den Arbeitsplatz und Komfort. Anhand einer 5-stufigen Skala von 1 („nie“) bis 5 („sehr oft/ständig“), wurden auftretende Beeinträchtigungen durch Umgebungsfaktoren eingestuft. In Bild 5 wird die Häufigkeit des Auftretens durch die beiden Ja-Kategorien 4 („eher oft“) und 5 („sehr oft / ständig“) als Summenprozent zusammengefasst [9-Amstutz 2010, S.39].

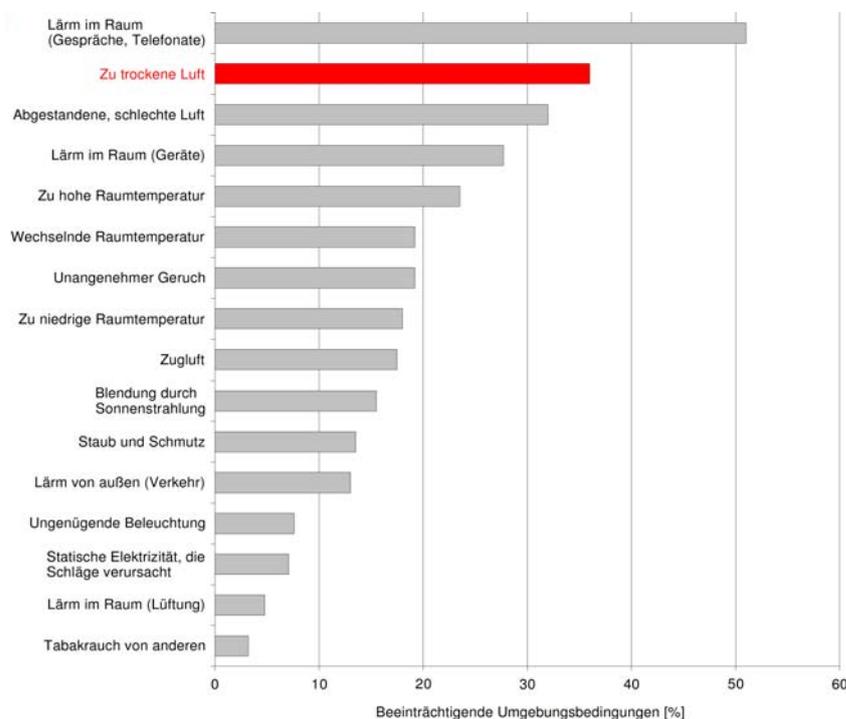


Bild 5:
Beeinträchtigte Umgebungsbedingungen nach Häufigkeit
[9-Amstutz 2010, S.40 - Eigene Darstellung].

Bild 5 zeigt, dass mehr als die Hälfte aller befragten Personen Lärm im Raum (Hintergrundgespräche und Telefonate anderer Personen) als unangenehm empfindet. Ungefähr jede dritte Person fühlt sich durch trockene Luft am Arbeitsplatz beeinträchtigt. Des Weiteren sind abgestandene, schlechte Luft und die Lärmbelästigung durch Geräte, sowie zu hohe bzw. wechselnde Raumlufttemperaturen die am meist genannten Störfaktoren. Am seltensten wurden die Beeinträchtigungen durch unzureichende Beleuchtung, elektrostatische Aufladung, Lärm durch die Lüftungsanlage und Tabakrauch anderer angeführt [9-Amstutz 2010, S.40].

Eine weitere Untersuchung zum Thema „Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden“ wurde von der Projektgruppe Klima und Arbeit (ProKlimA) durchgeführt. Im Rahmen des Projekts wurden über 4500 Beschäftigte zu deren Bedingungen und Umfeld am Arbeitsplatz befragt. Die Studie aus dem Jahr 2003 stellt die größte und umfassendste Datenbasis zur Situation an deutschen Büroarbeitsplätzen dar. Die in Bild 6 dargestellte Beurteilung des Raumklimas erfolgte unter Berücksichtigung der Aspekte Luftqualität, Temperatur, Licht und Lärm [10-Bischof 2003, S.88].

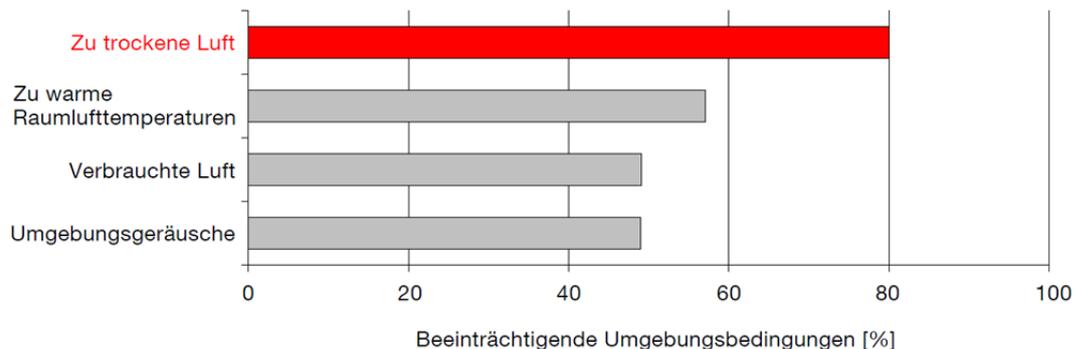


Bild 6:
Beurteilung und Beeinträchtigung durch das Raumklima
[10-Bischof 2003, S.88 - Eigene Darstellung].

Das ProKlimA-Projekt bestätigt den großen Einfluss der Raumluftfeuchte auf das wahrgenommene Raumklima. Bild 6 zeigt, dass sich 80 Prozent der Bürobeschäftigten von zu trockener Raumluft gestört fühlen. Die weiteren negativ bewerteten Kategorien und somit die am häufigsten genannten Beeinträchtigungen lauten: zu warme Raumlufttemperaturen (57,1 Prozent), verbrauchte Luft (49,1 Prozent) und störende Umgebungsgeräusche (49,0 Prozent) [10-Bischof 2003, S.88].

1.2.4 Technische Problemstellung

Zur Anpassung der relativen Luftfeuchte in Räumen stehen zwar unterschiedliche technische Lösungen zur Verfügung, jedoch weisen alle gewisse Nachteile auf. Im Einzelnen sind dies:

- Hoher Energieeinsatz
- Hoher Wartungsaufwand
- Häufig Probleme mit der Wasserhygiene
- Problematische Nachrüstung in bestehende Anlagen
- Feine Regelbarkeit der Befeuchtungsleistung
- Befeuchtung bei geringen Volumenströmen

Der hohe Energieaufwand resultiert aus der Tatsache, dass zur Einbringung von Wasser in die Luft, diese üblicherweise entweder zerstäubt oder verdampft wird. In beiden Fällen ist entweder durch den notwendigen Druck bzw. der hohen Temperatur ein sehr hoher Energieeinsatz nötig, um eine ausreichende Befeuchtungsleistung zu gewährleisten. Insgesamt sind die Anlagen auch sehr wartungsintensiv, um die notwendige Lufthygiene sicherzustellen.

Es bilden sich schnell Keime oder Algen im Wasser, die entweder den unerwünschten Zusatz von Chemikalien erfordert oder erneut den Einsatz von Energie zur ausreichenden Erwärmung.

Gerade in der Nachrüstung gibt es große Probleme und Bedenken in Form einer zentralen Luftbefeuchtung, wenn die Leitungsführung nicht von Anfang an auf eine Luftbefeuchtung ausgelegt wurde. In diesem Fall verbleiben lediglich noch dezentrale Systeme als Lösung, welche mit sehr hohem Kosten- und Wartungsaufwand direkt im Raum platziert werden.

Solange die Luftvolumenströme ausreichend konstant sind, kann auch eine ausreichende Regelung der Luftfeuchte erfolgen. Klassische Dampfbefeuchter geben das Wasser immer in Stößen ab, so dass dies eher ein gepulstes Einbringen als ein kontinuierlicher und gut zu regelnder Prozess ist. Um den Energieverbrauch in den Gebäuden zu senken, kommen verstärkt Systeme zum Einsatz, welche die Luftmengen dem wirklichen Lüftungsbedarf in den Räumen durch installierte Sensoren anpassen. Dadurch schwanken die Luftmengen jedoch kontinuierlich, was eine feine Regelbarkeit der Luftfeuchte mit den heute verfügbaren Lösungen sehr schwer gestaltet.

1.3 Stand von Wissenschaft und Technik

1.3.1 Physikalische Befeuchtungsprinzipien

Allgemein betrachtet, erfolgt eine Befeuchtung der Luft, indem Wasser dem Luftstrom zugeführt wird. Die Umwandlung des Aggregatzustandes von Wasser zu Dampf bewirkt bei der Luftbefeuchtung einen Phasenübergang. In Abhängigkeit des eingesetzten Systems ergibt sich nach dem Prozess eine Änderung des Luftzustandes, welcher durch die Größen von relativer und absoluter Feuchte charakterisiert wird. Im Wesentlichen erfolgen die Methoden zur Luftbefeuchtung nach drei physikalischen Prinzipien [11-Recknagel 2008, S.1205]

- Verdampfen
- Zerstäuben
- Verdunsten

Verdampfen

Die Teilchen eines Stoffsystems befinden sich bei bestimmten Werten von Druck und Temperatur in einem definierten thermischen Bewegungszustand. Folglich hat dieser Bewegungszustand auch einen bestimmten Bindungszustand. Durch die geometrische Ordnung der Teilchen bildet sich ein Raumgitter. Sobald dem System thermische Energie zugeführt wird, ändert sich der Bewegungszustand der Teilchen so stark, bis das Raumgitter zerfällt. Dadurch entsteht ein Phasenübergang im Stoffsystem. Beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand wird die Umwandlungstemperatur sehr stark vom Umgebungsdruck beeinflusst. Sobald der Siedepunkt erreicht ist, wird der Übergang von einem Aggregatzustand zum anderen vollzogen. Während der Verdampfung bleibt die Temperatur, trotz zugeführter Wärme, konstant. Verdampfung tritt also auf, wenn man eine Flüssigkeit auf Siedetemperatur erhitzt und weiterhin Wärme zuführt [12-Steger 2006, S.28].

Zerstäuben

Unter Zerstäuben versteht man das Zerkleinern von zusammenhängenden Wassertropfchen in kleinste Partikel. Um die wirksame Oberflächenspannung der Flüssigkeit zu überwinden, muss dem System Energie zugeführt werden. In Zerstäuberdüsen wird ein Fluid durch Druckminderung beschleunigt und die kinetische Energie der austretenden Flüssigkeit genutzt, um diese zu zerteilen. Die Verengung des Austrittsquerschnitts bewirkt eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit. Aufgrund der daraus resultierenden laminaren Strömung zerfällt der austretende Flüssigkeitsstrahl in einzelne Tröpfchen. Folglich bildet sich ein Gemisch aus flüssigen Schwebeteilchen in einem Gas, welches man als „Aerosol“ bezeichnet [13-Henne 1995, S.91].

Verdunsten

Die Verdunstung beschreibt den Phasenübergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand ohne jedoch die Siedetemperatur zu erreichen. Hierbei verlassen die flüssigen Moleküle das Wasser und verflüchtigen sich in den gasförmigen Zustand. Eine Flüssigkeit besteht aus Teilchen, welche sich frei bewegen können. Zwischen diesen Partikeln herrscht jedoch eine Anziehung. Die flüssigen Moleküle weisen eine bestimmte Geschwindigkeitsverteilung auf und verfügen daher über eine spezifische kinetische Energie. Wird dem System Energie in Form von Wärme zugeführt, erhöht sich die Geschwindigkeit der Teilchen. Schließlich sind die Moleküle so schnell, dass sie voneinander abprallen und von der flüssigen Phase in die gasförmige Phase eintreten. Ein Verdunstungsprozess läuft umso schneller ab, je höher die Teilchentemperatur und je größer die Flüssigkeitsoberfläche ist [14-Chemie.de 2016].

1.3.2 Systeme und Anwendungen der Luftbefeuchtung

Es gibt die unterschiedlichsten Lösungen und Verfahren zur Luftbefeuchtung. Prinzipiell lassen sich die Technologien der Luftbefeuchter in zwei Gruppen einteilen. Als Befeuchtungsmedium kann entweder Wasser (Wasserverdunstung < 100 °C) oder Dampf (Wasserverdampfung ≥ 100 °C) eingesetzt werden. Die praktische Auslegung und Beurteilung von Luftbefeuchtungssystemen erfolgt anhand der Befeuchtungsleistung. Zur Ermittlung dieser physikalischen Größe wird folgender Zusammenhang nach Formel (3.13) definiert [8-Iselt 1996, S.111].

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O/D}} = \dot{V}_L * \rho_L * (x_2 - x_1) \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O/D}}$	[kg/h]	Befeuchtungsleistung
\dot{V}_L	[m ³ /h]	Luftvolumenstrom
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte
x_2, x_1	[kg/kg]	Absolute Feuchte vor/nach Befeuchtung

Des Weiteren lässt sich noch zwischen zentraler und dezentraler Luftbefeuchtung unterscheiden. Die klassische Luftbefeuchtung wird zentral in RLT-Anlagen vorgenommen. Als technische Lösungen stehen drei physikalische Verfahren zur Auswahl: Sprüh-, Verdunstungs- und Dampfbefeuchtung.

Luftwäscher (Zerstäubungs- oder Umlaufsprühbefeuchter)

Bei Luftwäschern wird durch ein Rohrverteilsystem mittels Spritzdüsen und einem Druck von 2-3 bar, fein zerstäubtes Wasser in den durchströmenden Luftstrom eingesprüht. Um eine gleichmäßige Feuchteverteilung zu erreichen, sind die Düsen wie in Bild 7 ersichtlich, über dem gesamten Kanalquerschnitt ein- oder zweireihig angeordnet. Die eingebrachten Wassertröpfchen werden vom Luftvolumenstrom aufgenommen und bewirken infolge des Verdunstungsprozesses eine Feuchteerhöhung. Aufgrund der Tatsache, dass bei Verdunstung der Wassertröpfchen dem Luftvolumenstrom Wärme entzogen wird, kühlt sich

die Luft auch gleichzeitig ab. In Abhängigkeit der Anforderungskriterien an den Raumluftzustand muss im Winter der Luftstrom eventuell nachgeheizt werden. Während der Sommermonate kann der Befeuchtungsprozess als Kühleffekt genutzt werden. Der Großteil des eingesprützten Wassers wird nicht verdunstet und fällt in ein Auffangbecken zurück. Die überschüssige Wassermenge wird anschließend über einen Tropfenabscheider teilweise abgeschieden und danach von einer Umwälzpumpe zurück zu den Düsenstöcken gefördert. Anhand einer automatischen Nachspeisung von aufbereitetem Leitungswasser (VE), wird der an die Luft abgegebene Wasseranteil ersetzt und der Kreislauf konstant gehalten. Durch diese Befeuchtungssysteme können auch atmosphärische Belastungen, große Staubteilchen und einige Gase (z. B. SO_2) zurückgehalten werden. Aus diesem Grund übernehmen Luftwäscher eine regelrechte Waschfunktion. Dieser Nebeneffekt kann einerseits als Vorteil angesehen werden, jedoch birgt das Auswaschen von organischen Stoffen auch die erhöhte Gefahr von Keimbildung in der Befeuchtungskammer [15-Keller 2014, S.229].

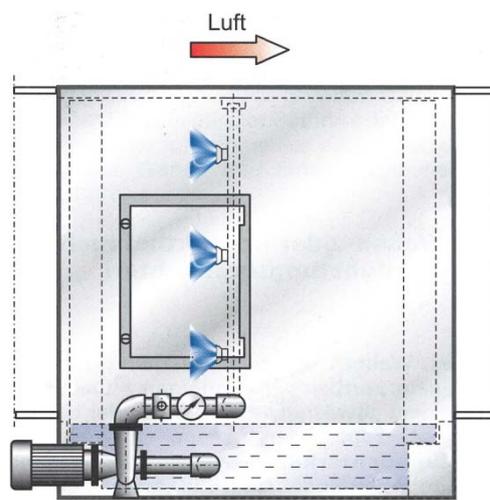


Bild 7:
Funktionsbild Luftwäscher [16-Schlagnitweit 2006, S.179].

Dampfbefeuchter

Bei Dampfbefeuchtern wird als Feuchteträger meist Satttdampf im Temperaturbereich von 105 bis 110 °C verwendet. Über die im Zuluftkanal angebrachten Dampfverteilerrohre mit integrierten Dampfzungen wird das Befeuchtungsmedium direkt mit dem Luftstrom vermischt. Wie beim Luftwäscher, sind auch hier die Düsen möglichst über den gesamten Strömungsquerschnitt anzuordnen. Die resultierende, homogene Dampfausbreitung durch freie Konvektion soll dadurch gewährleistet werden. Außerhalb des Luftstroms befindet sich eine MSRT-Komponente, bestehend aus Ventileinheit und Regelventil. Mittels dieser Einheit wird nur jene Menge an Dampf eingedüst, die der Volumenstrom auch aufnehmen kann. Anhand der isothermen Dampfbefeuchtung bleibt die Lufttemperatur während des Prozesses annähernd konstant und eine Nacherwärmung ist nicht notwendig. Da der Satttdampf bei den hohen Temperaturen weitgehend keimfrei ist, kann diese Befeuchtungsvariante grundsätzlich hygie-

nisch einwandfrei betrieben werden. Nichtsdestotrotz müssen Dampfbefeuchtungssysteme für einen hygienischen Betrieb so geplant werden, dass kein Kondensat in den Luftleitungskanal gelangt. Des Weiteren muss das im Dampfverteiler entstehende Kondensat über einen separaten Wasserablauf abgeführt werden. Zum Betrieb des Befeuchtungsprozesses kann die Dampfversorgung entweder über ein bestehendes Dampfnetz oder wie in Bild 8 dargestellt, über einen gesonderten Dampferzeuger sichergestellt werden. Für die Eigendampferzeugung können Elektroden, Widerstandselemente oder Gas verwendet werden [17-Henne 1995, S.64].

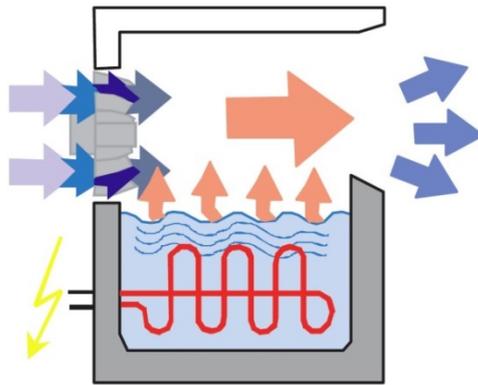


Bild 8:
Funktionsbild Dampfbefeuchter [18-HVBG 2007, S.11].

Ultraschallbefeuchter (Vernebler)

Bei diesem Befeuchtungssystem wird Wasser in Form eines feinen Aerosolnebels in die Zuluft eingebracht. In Ultraschallzerstäubern werden durch die Einwirkung eines Schwingers winzige Luftbläschen mit einem Durchmesser von 7 bis 10 μm in einem Wasserbehälter gebildet. Der sogenannte „Transducer“ arbeitet mit einer Frequenz von 1,7 MHz und die Erregerplatte erzeugt elektrische Hochfrequenzschwingungen. Nachdem am Boden des Befeuchters die Ultraschallschwingungen in mechanische Schwingungen umgewandelt wurden, bewegt sich die resultierende Energie zu einem Fokussierungspunkt in der Wasser-Luft-Grenzschicht. Die Schwingungen bewirken durch die dauerhafte Komprimierung und Dekomprimierung der Wassersäule ein temporäres Vakuum unter der Wasseroberfläche. Der Effekt hat die Bildung von Kavitation zur Folge. Sobald die Luftbläschen an der Wasseroberfläche ankommen, steigt feiner Nebel in die Luft auf. Hinsichtlich eines dauerhaften Betriebs ist zu beachten, dass die Geräte nur mit VE-Wasser betrieben werden sollten. Der große Vorteil eines Ultraschallzerstäubers besteht darin, dass Schadstoffe im Befeuchterwasser durch die hohe Schwingungsfrequenz zerstört werden [19-Fitzner 2000, S.28]. Bild 9 zeigt den beschriebenen Befeuchtungsprozess anhand schematischer Darstellung.

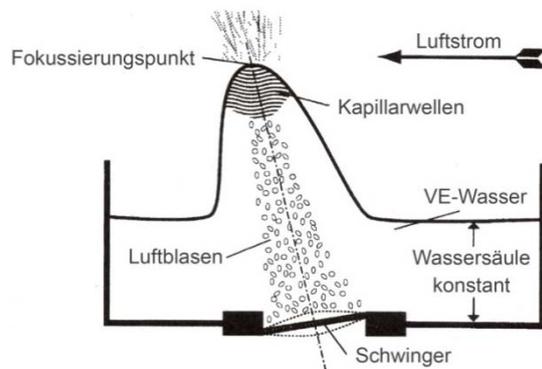


Bild 9:
Funktionsbild Ultraschallbefeuchter [11-Recknagel 2008, S.1208].

Verdunstungsbefeuchter (Waben- oder Kontaktbefeuchter)

Im korrosionsbeständigen Gehäuse des Gerätes befinden sich ein Wassertank und eine große Verdunstungsfläche. Zur Herstellung der porösen, wabenförmigen Feuchteübertragungsflächen werden üblicherweise Aluminium, Keramik, Glasfaser oder imprägniertes Zellulosematerial verwendet. Mittels Umwälzpumpe wird das Fluid aus der offenen Wasserwanne angesaugt und wie in Bild 10 skizziert, an der Oberseite der Befeuchterkassette möglichst gleichmäßig eingebracht. Entlang der Verdunstermatten strömt das Wasser nach unten und wird von den Wabepaketen aufgenommen. Anschließend verrieselt das Wasser und wird an die zu befeuchtende, vorbeiströmende Luft abgegeben. Anhand des Verdunstungsprozesses erfährt der durch die Waben strömende Luftstrom eine Feuchteerhöhung. Für die Verdunstung wird Wärme benötigt, welche der Luft entzogen wird. In Abhängigkeit der Anwendung muss die Luft daher eventuell nacherwärmt werden. Die nicht verdunstete Wassermenge strömt weiter nach unten in einen Auffangbehälter und wird dort erneut dem Befeuchtungskreislauf zugeführt. Mittels Wassernachspeisung wird ein konstanter H_2O -Massenstrom sichergestellt. Da die benetzte Befeuchteroberfläche auch als Nassfilter wirkt, tritt neben dem Befeuchtungseffekt auch ein gewisser Reinigungseffekt ein. Das mit Schadstoffen belastete Wasser, welches vom Luftstrom nicht aufgenommen wird, rieselt in den Auffangbehälter und stellt ein hygienisches Risiko dar. Als Konsequenz möglicher Bildung von Keimen und Mikroorganismen ist der Wassertank bzw. das Wabepaketet regelmäßig zu reinigen und zu desinfizieren [16-Schlagnitweit 2006, S.180].

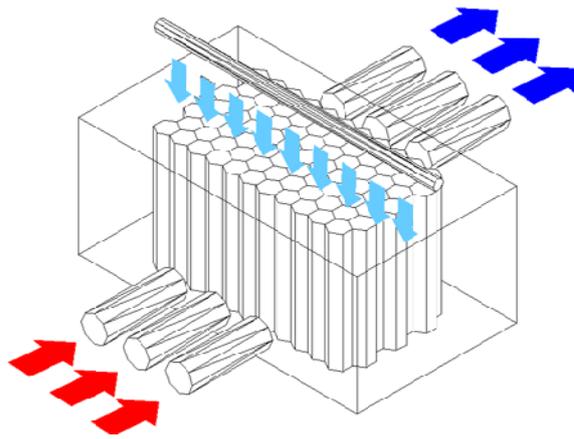


Bild 10:
Funktionsbild Verdunstungsbefeuchter [20-Schütz 2016].

Alternative Luftbefeuchtung

Unter alternativen Luftbefeuchtungssystemen werden diverse Hilfsmittel verstanden, die unter günstigen Voraussetzungen die Raumluftfeuchte kurzfristig erhöhen können. Da diese Verfahren nicht regelbar sind, kann je nach Befeuchtungsmethode eine nur sehr geringfügige Feuchteerhöhung erfolgen oder aber bis hin zur Überfeuchtung führen. Als Beispiele für alternative Luftbefeuchtungssysteme sind Heizkörperverdunster, Zimmerpflanzen oder die Wäschetrocknung in Innenräumen anzuführen. Damit können konventionelle Luftbefeuchter nicht annähernd ersetzt werden, da diese Abhilfen nur einen Bruchteil der Feuchtigkeit abgeben. So besteht z. B. beim Wäschetrocknen die zusätzliche Problematik, dass innerhalb kurzer Zeit sehr viel Feuchte unkontrolliert freigesetzt wird. Eine weitere Problematik dieser Systeme sind z. B. die hygienisch mangelhaften Zustände eines Heizkörperverdunsters.

Um die Raumluftfeuchte zu erhöhen, kommen häufig Pflanzen als Sofortmaßnahme zum Einsatz. Pflanzen wirken sich positiv auf das psychische Wohlbefinden der Nutzer aus und können auch einem gewissen Beitrag zum Abbau von Schadstoffen in der Umgebungsluft leisten. Hinsichtlich der Raumluftbefeuchtung stoßen Pflanzen jedoch sehr schnell an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Nur in den seltensten Fällen kann das Gewächs zur Erhöhung der Luftfeuchte wesentlich beitragen. Die Lebewesen regulieren über Spaltöffnungen ihren Wasserhaushalt. Bei trockener Raumluft, also wenn die Feuchtigkeit benötigt wird, schließen sich die Spaltöffnungen. Als Folge verringert sich die Wasserabgabe oder kommt sogar vollständig zum Erliegen. Aus diesem Grund sind Pflanzen durch die sehr geringe Befeuchtungseffektivität und die fehlende Steuerungsmöglichkeit als alleinige Feuchtespender ungeeignet. Werden die Pflanzen hinsichtlich der Pflege vernachlässigt, können zudem Schimmelpilze in der Blumenerde entstehen, deren Sporen sich in der Raumluft ausbreiten [18-HVVG 2007, S.25].

In Haushalten wird das Wäschetrocknen zur Erhöhung der Raumlufftfeuchte häufig angewendet. Abhängig von der Größe einer Wäscheladung beinhaltet diese ungefähr zwei Liter Restfeuchte. Um die Raumlufftfeuchte in den Wohnräumen dauerhaft auf einen behaglichen Wert zu erhöhen, müsste man durch die äußerst geringe Effizienz mehrmals pro Tag frisch gewaschene Wäsche aufhängen. Durch die unkontrollierte Feuchtigkeitsabgabe besteht die Gefahr der kurzzeitigen Überbefeuchtung. Das kann sich durch eventuelle Schimmelbildung empfindlich auf die Gebäudesubstanz auswirken und Bauschäden auslösen. Um den Befeuchtungsprozess mittels Wäschetrocknen zu beschleunigen, werden die Textilien oftmals am Heizkörper aufgehängt, was zu einem weiteren negativen Aspekt führt. Durch die behängten Heizflächen verringern sich einerseits der Anteil an Strahlungswärme und andererseits der Konvektionsstrom. Eine Erhöhung der Heizkosten ist zwangsläufig die Folge.

Heizkörper-Verdunstungsgefäße sind Wasserbehälter, die man in der Nähe von Heizflächen aufstellt oder an Heizkörpern befestigt. Nach und nach verdunstet das Wasser, jedoch ist die Befeuchtungseffektivität der kleinen Wasserschälchen durch die geringe Wirkungsweise auf ein sehr geringes Maß beschränkt. Außerdem besteht bei dieser Befeuchtungsvariante die Gefahr, dass durch unregelmäßige Reinigung der Keramikgefäße ein Hygieneproblem entsteht. Das erwärmte Wasser ist ein idealer Nährboden für Keime und begünstigt das Wachstum von Legionellen bzw. Bakterien.

Neben diesen alternativen Luftbefeuchtungssystemen stellen auch Personen anhand ihrer Atmung und Wasserabgabe über die Hautoberfläche durch Verdunstung eine Feuchtequelle dar. Die Feuchteabgabe von Menschen ist vom Aktivitätsgrad und der Umgebungstemperatur abhängig.

Die spezifischen Wasserabgaben verschiedener Feuchtequellen werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2:
Feuchteabgaben menschlicher Aktivitäten [21-Hartmann 2006, S.117].

Erwachsene Person	60 g/h (Sommer), 35 g/h (Winter)
Kind	30 g/h (Sommer), 18 g/h (Winter)
Zimmerpflanze	2 g/h (Nord-Ausrichtung), 8 g/h (Süd-Ausrichtung)
Spülen (Hand)	50 g/Vorgang
Geschirrspüler	100 g/Vorgang
Kochen	500 g/Vorgang
Wäsche (4,5 kg Füllung)	2200 g/Vorgang, Trocknungsvorgang über 22 h

1.3.3 Neue innovative Technologien

Als Lösung zur Raumluftbefeuchtung existieren wie beschrieben verschiedene konventionelle Funktionsprinzipien, wie die Verdampfung, die Verdunstung oder die Zerstäubung des Wassers. Derartige Luftbefeuchter, die meistens auf einem Wasser zu Luft System basieren, sind jedoch durch einen hohen Energieverbrauch, hygienischer Gefährdungspotentiale und einen hohen Wartungsaufwand gekennzeichnet.

Im Rahmen des EU-Projektes „iSPACE innovative Systems for Personalised Aircraft Cabin Environment“ wurden am Fraunhofer IBP alternative Vorrichtungen zur Luftbefeuchtung untersucht. Die Verwendung einer Trennmembrane, die nur die Wassermoleküle zwischen einem vom Wasser durchströmten und einem von der zu befeuchtenden Luft durchströmten Bereich diffundieren lässt, ermöglichte eine regulierbare Befeuchtungsleistung ohne den oben genannten Nachteilen. Der Wassertransport erfolgt durch die Partialdruckdifferenz zwischen beiden Seiten der Membrane. Je höher die Wassertemperatur, desto größer die Wasserdampfdiffusion [22-Jehle, 2009]. Bei einer präzisen Wassertemperaturregulierung, und anhand anderer Parameter wie die Charakteristiken und die Dicke des Membranmaterials sowie der Geschwindigkeit des Wassers und der Luft wird der Diffusionskoeffizient präzise regulierbar. Daher kann eine sehr genaue Regulierung der Raumfeuchte erfolgen, was mit den vorherigen Systemen unmöglich war.

Diese Membranen wurden bislang vorwiegend nur für den Feuchtehaushalt in Brennstoffzellen und zur Gasanalyse verwendet.

Bereits im Jahr 1997 wurde am Fraunhofer IGB eine erste Untersuchung zur aktiven Raumbefeuchtung mit High-Tech-Membranen erfolgreich durchgeführt. Diese Untersuchung hatte bereits neben den technischen auch die positiven hygienischen Eigenschaften der Technologie nachgewiesen.

Hinsichtlich VOCs besitzen die Membranen auch eine sichere Trenneigenschaft, so dass es nicht zu kumulierten Emissionen kommt. Diese Trennungseigenschaft ist sehr verlässlich, und wird im Medizinbereich verwendet [23-Camacho, 2013]. Proximale Befeuchtungsgeräte unter Verwendung einer wasserabstoßenden Membrane sind bereits am Markt erhältlich. Diese medizinischen Geräte sind für eine Nutzung in Verbindung mit entweder einen Endotrachealschlauch oder einer Atemmaske konzipiert, und somit nur sehr lokaler und individueller Nutzung angemessen [24-Mabini, 2012].

2 Anforderungen und Ziele

Das Projekt wurde von Beginn an in enger Koordination und Abstimmung mit den beteiligten Industrieunternehmen aufgesetzt. Mit allen Projektpartnern wurden mehrere bilaterale Projekttreffen durchgeführt. Zunächst, um die Projektziele, die gemeinsame Vorgehensweise sowie die zugeordneten Arbeitsinhalte abzustimmen, die weiteren, um erste Projektergebnisse sowie die Herstellung weiterer geplanter Funktionsmuster zu diskutieren, sowie zur Abstimmung spezieller eigener Funktionsmuster.

Hinsichtlich der in der Untersuchung verwendeten Membranlösungen gab es zwischen den Projektpartnern einen intensiven Informationsaustausch.

Zur Identifikation sinnvoller Materiallösungen war es zunächst nötig, in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern wichtige und relevante Leistungsanforderungen in Bezug auf die angestrebte Verwertung zu formulieren. Da sich hierbei die Verwertungsziele als unterschiedlich dargestellt haben, ergab sich auch ein differenziertes Anforderungsprofil als Grundlage für die Auswahl geeigneter Membranlösungen.

Tabelle 3:
Übersicht Verwertungsziele und Anforderungen der Industriepartner.

Projektpartner	Verwertungsziel	Wichtige Leistungskriterien
Westaflex GmbH	Dezentrale Befeuchtungslösung	Einfache Konstruktion Mittlere Befeuchtungsleistung Einfache Wartung und Wechsel (Kartusche) Geringe Abmessungen Ansprechendes Design
Kurecon GmbH	Systemintegrierte Lösung	Präzise Feuchtsteuerung Modularer Einbau Einfache Wartung
Vaillant GmbH	Lüftungsgeräte-Integration	Modularer Einbau Maximale Lufthygiene Einfache Wartung Hohe Befeuchtungsleistung Luft-Luft-Befeuchtung

Grundsätzlich bestand das Ziel der Untersuchung darin, die Leistungsfähigkeit und die Potentiale der High-Tech Membranen für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche zu untersuchen. Zusätzlich sollten aber zum Vergleich auch weitere heute verfügbare Membranlösungen mit ähnlichen Leistungspotential herangezogen werden. Auf dieser Grundlage wurden unterschiedliche Materiallösungen am Markt recherchiert und hinsichtlich der Leistungspotentiale beurteilt. Um einen guten Vergleich zu ermöglichen, wurden hierzu Produkte aus unterschiedlichen Anwendungskontexten identifiziert. Somit wurde die Untersuchung neben den beschriebenen Ionomeren noch um gängige textilbasierte

Lösungen (z.B. GORE-Tex®) bzw. Lösungen aus dem Baubereich (z.B. Tyvek®) ergänzt.

Darüber hinaus wurden auch ganz neuartige Materialien wie z.B. Graphene in die Erstevaluation geeigneter Materiallösungen aufgenommen. Auch diese weisen ähnliche Eigenschaften auf, haben sich jedoch hinsichtlich einer Anwendung und Umsetzung im hier geplanten Anwendungsfall als nicht geeignet erwiesen.

Der Untersuchungsschwerpunkt liegt jedoch auf den neu entwickelten Materiallösungen der Ionomere, welche aus den Materialeigenschaften abgeleitet, die mit Abstand besten Voraussetzungen für eine Anwendung als Befeuchtungslösung aufweisen. In Vorversuchen wurde hierbei bereits mit Nafion® gearbeitet, welches ein hohes Leistungspotential gezeigt hat.

Nafion® wurde bereits Ende der 60-er Jahre von Dr. Walther Groth durch Modifizieren von Teflon hergestellt. Nafion® war zu dieser Zeit das erste synthetische Polymer mit ionischen Eigenschaften und somit das erste Mitglied einer völlig neuen Gruppe von Polymeren – den Ionomeren. Diese sind thermoplastische Kunststoffe und werden durch Copolymerisation (eine Art der Polyreaktion - Monomere werden in Polymere überführt) eines unpolaren mit einem polaren Monomer gewonnen. Die polaren Bindungen verhindern die Bildung von kristallinen Bereichen im Polymer und führen zu einer „ionischen Vernetzung“.

Durch die Gegenwart von Sulfonsäuregruppen, welche stark ionische Eigenschaften besitzen, wurden die besonderen Eigenschaften von Nafion® erreicht. Dieses zeigt dadurch von Teflon abweichende Charakteristika unter Beibehaltung der hohen chemischen Resistenz:

- Widerstandsfähigkeit gegen aggressive chemische Zusammensetzungen
- Standhalten von hohen Betriebstemperaturen (bis 190 °C)
- Stark ionenleitend
- Supersäuren-Katalysator
- Stark selektiv leitend für Protonen und andere Kationen
- Diffusionsoffen für Wasser(-dampf)

Sobald Nafion® in seiner endgültigen Form extrudiert ist (hauptsächlich als Blatt oder Rohr), wird es chemisch durch die Umwandlung der Salze in Säure aktiviert. In diesem Stadium ist Nafion® ein transluzenter Kunststoff, der Teflon ähnlich sieht, nur ist er klarer und weniger opaleszent (siehe Bild 11).

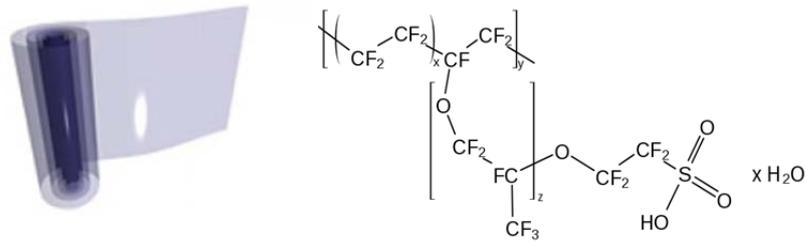


Bild 11:
Abbildung einer Nafion® Membran sowie der chemischen Formel.

Sobald eine Nafion®-Membran aktiviert ist, fängt sie an Feuchtigkeit aufzunehmen und mit der Umgebung auszutauschen. Reaktive organische Gase aus der umgebenden Luft reagieren, wenn sie der supersäurekatalytischen Aktivität der Membran ausgesetzt werden. Im Laufe der Zeit können sich organische Ablagerungen auf Nafion® ansammeln, welche die ursprüngliche Farbe ändern (gelb -> braun -> schwarz). Die chemische Beschaffenheit von Nafion® wird dadurch nicht verändert; wenn die Membranen bereits schwarz sind, findet jedoch ein Verlust der Effizienz um einige Prozente statt. Eine effektive Reinigung kann durch das Kochen in starken Säuren erfolgen, was im Kontext der Untersuchung vor allem für Wartungszyklen und Standzeiten von größerer Bedeutung ist.

Bisher werden Nafion®-Membranen für folgende technische Anwendungen genutzt:

- Ionenaustauschermembranen bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse
- Trocknung oder Befeuchtung von Gasen aufgrund ihrer hohen Selektivität und Permeabilität für Wasser(dampf)
- Protonenaustauschermembran bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen und bei Direktmethanolbrennstoffzellen
- Herstellung von Chromsäure und Regenerierung von verunreinigten Chrombädern
- Herstellung von Kaliumdicyanoaurat durch Auflösung einer Goldanode in Kaliumcyanid
- Als stark saurer, fester Katalysator

In den folgenden Versuchen wird eine Membran mit der Produktbezeichnung VANADion® der Firma Ion Power verwendet (siehe Bild 12). Diese besitzt eine sehr dünne Schicht von Nafion® auf einem porösen Substrat und stellt somit eine Verbundmembran mit niedrigem Ölgehalt dar. Der Vorteil gegenüber Nafion® ist, dass die Membran so - laut Hersteller - diffusionsoffener ist. Außerdem ist sie preislich günstiger, was in der späteren Anwendungsphase eine Rolle spielt. Sie hat eine hohe Leitfähigkeit, welche eine hohe Zelleistung mit sich bringt, jedoch behält sie eine hohe Zellspannung was der Stabilität zuträglich ist.

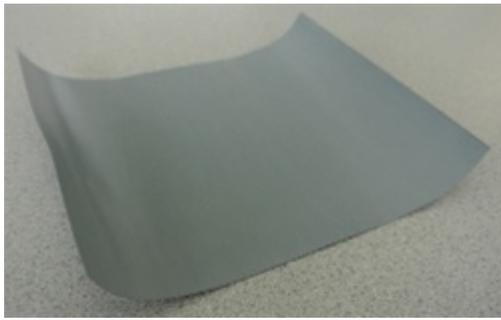


Bild 12:
Abbildung der VANADion® Membran.

Die VANADion® Membran ist deutlich robuster als das Nafion® und eignet sich daher deutlich besser für die vorliegenden Anwendungen.

3 Ermittlung von Leistungskennwerten

3.1 Basiskenngrößen

Grundsätzlich gibt es eine Reihe von Transportphänomenen für Flüssigkeiten und Gase.

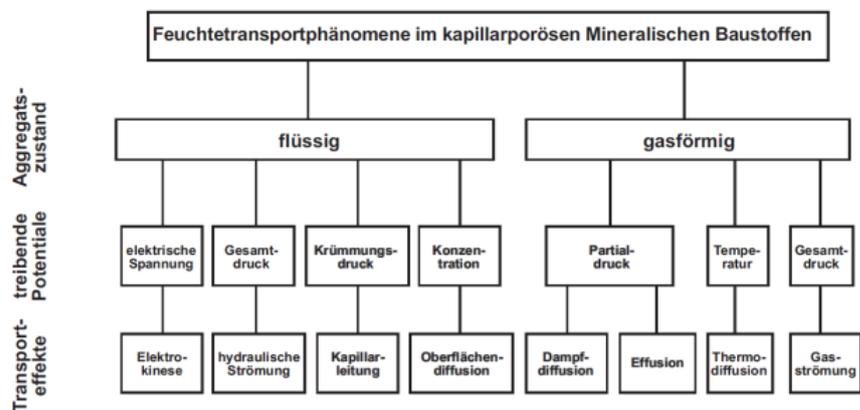


Bild 13:
Schematische Übersicht über die Feuchttransportphänomene in porösen mineralischen Baustoffen.

Den in diesem Zusammenhang für die Untersuchung relevanten Transportmechanismus stellt der Partialdruckunterschied dar, der für alle üblichen Anwendungen im beschriebenen Kontext maßgeblich ist (siehe Bild 13).

Als Kenngröße liegt diesem Prozess die Dampfdiffusionswiderstandszahl μ zugrunde. Diese beschreibt den Wasserdampf-widerstand eines Materials im Vergleich zu ruhender Luft bei Normaldruck. Sie setzt den Dampfdiffusionswiderstand des Materials in Relation zu dem Widerstand einer gleich dicken Luftschicht.

Zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ werden gemäß DIN EN ISO 12572 zwei Versuche durchgeführt: das Trockenbereichsverfahren (dry-cup) zwischen 0 bis 50 Prozent und das Feuchtebereichsverfahren (wet-cup) zwischen 50 bis 100 Prozent relativer Luftfeuchte. Dabei wird die Probe auf das Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. In einer Schale befindet sich beim „dry-cup“ Versuch Trockenmittel (z. B. Silica-Gel). Somit wird eine Luftfeuchte von ca. 3 Prozent in der Schale erreicht. Durch den Partialdruckunterschied diffundiert die Umgebungsfeuchte (50 Prozent) in die Schale. Diese nimmt an Gewicht zu, welches mit einer Waage ermittelt wird. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen (siehe Bild 14).

Beim „wet-cup“ Versuch wird das Gefäß mit einer gesättigten Salzlösung gefüllt, damit sich in der Schale eine relative Luftfeuchtigkeit von 93 Prozent einstellt. Somit entsteht ein Diffusionsstrom aus der Schale heraus in eine Umgebungsluft mit 50%rF, was zu einem Gewichtsverlust führt.

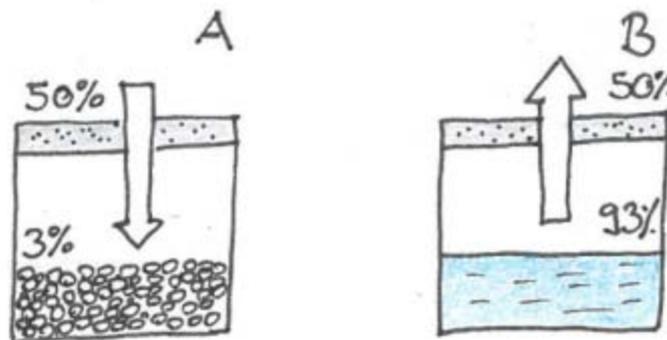


Bild 14:
Skizze der Trocken- (A) und Feuchtebereichsverfahrens (B).

Die Kennwerte mussten im Rahmen der Untersuchung lediglich für die identifizierte Lösung der Ionomere, also für VANADion[®], bestimmt werden, da die sd-Werte für die Standardmaterialien in den zugehörigen Datenblättern vorliegen.

Um die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von VANADion[®] zu ermitteln, wurden Feuchte- und Trockenbereichsverfahren angewendet. Dies hilft bei der Abschätzung der Folie und gibt erste Informationen über die Wasserdampfdurchlässigkeit der Membran. Da die Folie verhältnismäßig kostspielig und nur in den Abmessungen 30 x 30 cm erhältlich ist, wurde beschlossen, statt einer runden Probe mit einem Radius von 100 mm sechs kleine quadratische Proben zu untersuchen. Die Abmessung der aktiven Oberfläche der Proben beträgt im Schnitt 95 x 95 Millimeter. Eine der drei Folien wurde jeweils mit umgedrehter Seite eingespannt, um zu sehen, ob die Orientierung der Folie für die Dampfdiffusion von Bedeutung ist. Vor der Diffusionsmessung werden Dicke, Flächenmaße und Rohdichte der Folie ermittelt.

Folgende Mittelwerte konnten gemessen werden:

- Dicke: 0,25 mm, Standardabweichung: +/- 0,00 mm
- Flächenmaße: 132,9972 g/m², Standardabweichung: +/- 1,16 g/m²
- Rohdichte: 0,53 g/cm³, Standardabweichung: +/- 0,0041 g/cm³

Erklärung zur Benennung der Folien in Tabelle 2:

T = Trockenbereichsverfahren, F = Feuchtbereichsverfahren

Die Proben 3_T und 6_F wurden jeweils seitenverkehrt zu den anderen Folien eingespannt.

Tabelle 4:
Ergebnisse der Feuchte- und Trockenbereichsverfahrens:

	1_T	2_T	3_T	4_F	5_F	6_F
Länge der aktiven Oberfläche [mm]	94	93	91	94	93	95
Breite der aktiven Oberfläche [mm]	93	94	90	94	92	94
μ [-]	74,72	80,42	86,10	75,17	54,16	57,80
s_d [m]	0,019	0,020	0,022	0,019	0,014	0,015

Die s_d -Werte liegen unter 0,05 m, somit gilt die Folie als diffusionsoffen.

Wie bei den meisten Materialien fallen die Ergebnisse der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Feuchtbereichsverfahrens im Schnitt etwas niedriger aus als die Ergebnisse des Trockenbereichsverfahrens. Trotzdem sind die Ergebnisse zu nah beieinander um annehmen zu können, dass nennenswerte kapillare Kräfte in der Membran wirken.

Die Ausrichtung der Folie ist nicht von Bedeutung, da beide Werte (3_T, 6_F) keine nennenswerten Unterschiede zu den anderen Messungen aufweisen.



Bild 15:
„Wet-“ und „dry-cup“ Versuche mit der VANADion® Membran.

3.2 Entwicklung und Herstellung geeigneter Funktionsmuster

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit und der Kennwerte der zu untersuchenden Membranen wurden unterschiedliche Funktionsmuster entworfen und hergestellt. Hierzu gab es eine sehr intensive Zusammenarbeit mit den Industriepartnern, um sowohl deren Engineering-Kenntnisse zu nutzen, aber auch, damit die Funktionsmuster praxisingerecht ausgeführt werden.

Die ermittelten Leistungskennwerte und Testergebnisse wurden kontinuierlich diskutiert und die gemeinschaftlichen Erkenntnisse hinsichtlich der weiteren Lösungen genutzt.

3.2.1 Funktionsmuster 1 – Flächig aufgespannte Membrane

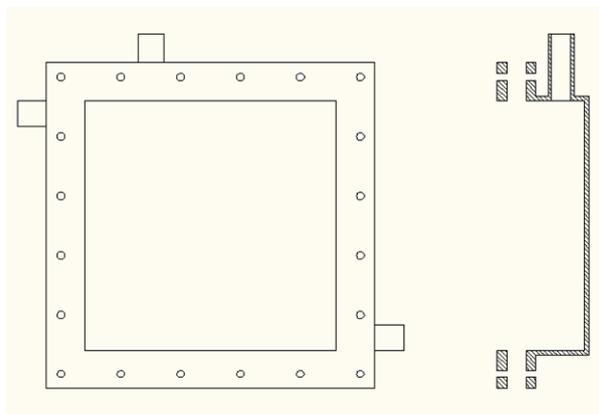


Bild 16:
Schematische Darstellung von Funktionsmuster 1.

Das erste Funktionsmuster besteht aus einem massiven Edelstahlrahmen, welches einen aufschraubbaren Rahmen besitzt. Somit kann zwischen dem wabenbildenden Grundkörper, in dem das Wasser eingefüllt wird eine Membran flächig und dicht angebracht werden, indem sie mit dem Rahmen auf den Grundkörper gepresst wird. Die Wanne besitzt 2 Wasseranschlüsse mit je $\frac{3}{4}$ "

und entsprechenden Absperrungen, um sowohl eine Durchströmung wie auch ein ruhendes Wasservolumen hinter der Membrane zu ermöglichen. Ein zusätzlicher Anschluss erlaubt die Einbringung eines Temperatur-Tauchfühlers. Die Abmessungen sind auf die verfügbare Größe der Nafion®-Membrane mit 30cm x 30cm angepasst.

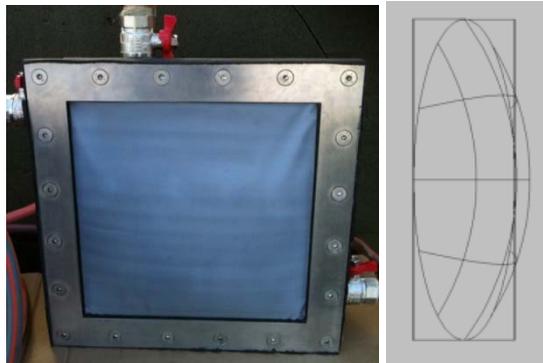


Bild 17:
Funktionsmuster 1 und Ermittlungsschema der wirksamen Übertragungsfläche.

Die Fläche der Membran kann nur näherungsweise abgeschätzt werden, da die Oberfläche sich durch den Wasserdruck nach außen beult. Um annähernd die Vergrößerung der Oberfläche der Membran abschätzen zu können, wird die Oberfläche als die Summe einer Kugelkalotte und der Rest als flache Flächen angenommen. Somit erhalten wir eine Membranfläche von 0,068 m² (Bild 17).

Zielstellung: Dieses Funktionsmuster dient ersten orientierenden Versuchen in einer Klimazelle zur Ermittlung des Einflusses von Luftanströmung und Wassertemperatur auf die Wasserdiffusion und Wasserabgabe in die Luft.

3.2.2 Funktionsmuster 2 – Prüfkörper für Textil-Membrane



Bild 18:
Funktionsmuster 2.

Das zweite Funktionsmuster weist einen ähnlichen Aufbau auf, wie das erste Funktionsmuster. Es besteht ebenfalls aus einem Edelstahl-Grundkörper zur Einbringung des Wassers. Es verfügt ebenfalls über zwei Anschlüsse, welche eine Durchströmung ermöglichen. Die Membrane wird wie zuvor mit einem aufschraubbaren Rahmen auf den Grundkörper gepresst. Das Abmaß wurde den verfügbaren Probekörpern der Textilmembranen angepasst. Die wirksame Membranfläche beträgt $0,143\text{m}^2$.

Zielstellung: Dieses Funktionsmuster dient ersten orientierenden Versuchen in einer Klimazelle zur Ermittlung des Einflusses von Luftanströmung und Wassertemperatur auf die Wasserdiffusion und Wasserabgabe in die Luft.

Die Funktionsmuster 1 und 2 standen aus den orientierenden Vorversuchen bereits zur Verfügung.

3.2.3 Funktionsmuster 3 – Rohrförmiger Prüfkörper zur kontinuierlichen Luftdurchströmung mit DN 110

Um der gewünschten Lösung einer marktnahen Umsetzungsvariante näher zu kommen, wurde das Funktionsmuster 3 entworfen und gebaut. Es weist im Gegensatz zu den ersten beiden Mustern eine rohrähnliche Struktur auf und beruht auf einer Lösungsidee, zu der es vom Fraunhofer IBP eine Patentanmeldung gibt.

Hierbei wird die Membrane zwischen zwei exakt im Durchmesser aufeinander abgestimmte Schalen geklemmt. Zur Übertragung des Wasserdampfes sind im Innenrohr Öffnungen vorgesehen. Das Abdichten zwischen dem Wasserreservoir und dem Innenquerschnitt zur Befeuchtung der Luft erfolgt durch das Quellverhalten der Membrane selbst.

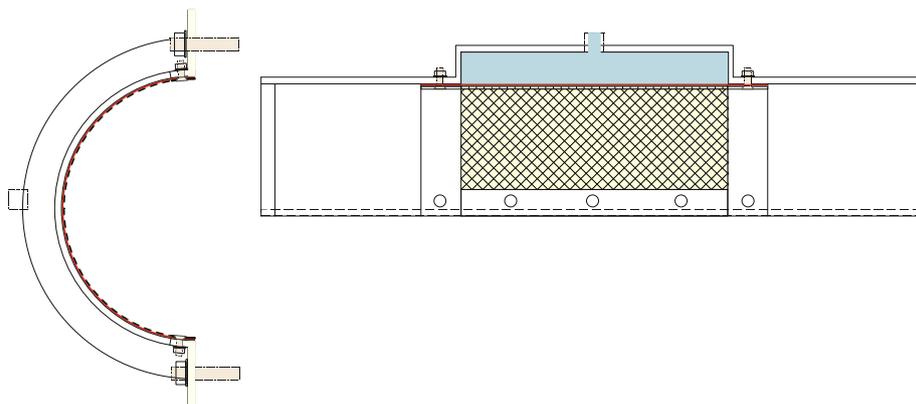


Bild 19:
Konstruktionszeichnung von Funktionsmuster 3.

Das Funktionsmuster 3 verfügt über eine wirksame Membranfläche von $0,04\text{m}^2$. Der Rohrdurchmesser beträgt 110mm . Die beiden Halbschalen, welche die Membran fixieren, besitzen jeweils einen Zu- und Abauf, um erneut sowohl ein Durchströmen, wie auch ein ruhendes Wasservolumen zu ermöglichen.

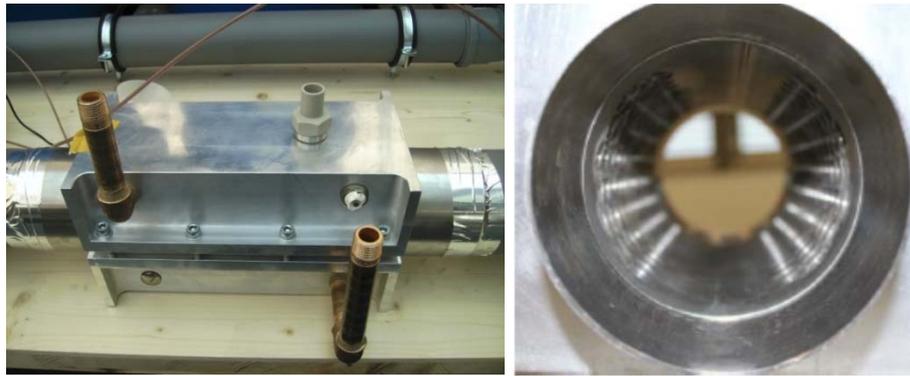


Bild 20:
Funktionsmuster 3 – Außen- und Innenansicht.

Zielstellung: Ziel dieses Funktionsmusters ist die Bestimmung der Befeuchtungsleistung in einem direkten Vorbeiströmen der zu befeuchtenden Luft. Dies entspricht einer üblichen Nutzung in zentralen Lüftungsanlagen. Es kann für unterschiedliche Membrane-Materialien verwendet werden.

3.2.4 Funktionsmuster 4 - Rohrförmiger Prüfkörper zur kontinuierlichen Luftdurchströmung mit DN 160

Um vor allem für die Versuche mit den Materialvariationen eine größere wirksame Übertragungsfläche bereit zu stellen, wurde nach dem gleichen Konstruktionsprinzip des Funktionsmusters 3 das Funktionsmuster 4 mit einem vergrößerten Querschnitt von DN 160 hergestellt.



Bild 21:
Funktionsmuster 4.

Wie bereits das Funktionsmuster 3 besitzt es an jeder der Halbschalen je zwei Wasseranschlüsse. Das Funktionsmuster 4 verfügt über eine wirksame Membranfläche von $0,08\text{m}^2$ und der Durchmesser beträgt 160mm.

Zielstellung: Das Funktionsmuster dient vor allem der Langzeitversuche zur Ermittlung von Einflüssen der Verschmutzung und der Wasserqualität auf die Befeuchtungsleistung.

3.2.5 Funktionsmuster 5

Das Funktionsmuster 5 wurde speziell für eine dezentrale Anwendung entwickelt und konzipiert. Die Form ist daher exakt auf das Abmaß eines Standard-Heizkörpers ausgelegt, auf den das Funktionsmuster platziert wird. Es weist erneut zwei wasserübertragende Flanken mit einem zentralen Luftkanal auf, welcher der Breite der Konvektionsöffnung des Heizkörpers entspricht.

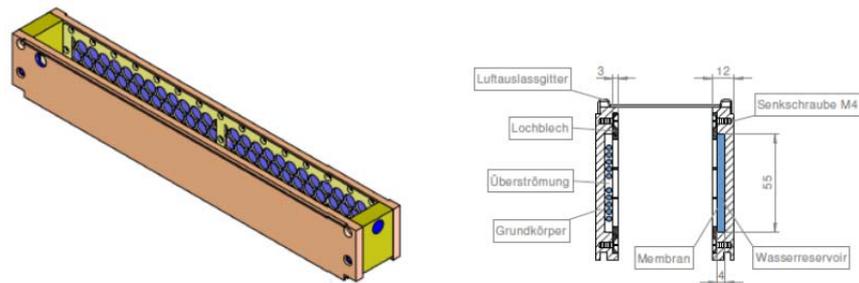


Bild 22:
3D-Ansicht und Schnitt des Funktionsmusters 5.

Bild 22 zeigt den Aufbau des Funktionsmusters, welches direkt auf einen handelsüblichen einreihigen Heizkörper mit einer Breite von 600mm aufgesetzt werden kann. Im Versuchsaufbau wurde in unserem Testlabor ein Heizkörper der Firma Cosmo mit den Abmaßen 600mm x 600mm verwendet. Vorteil dieser Lösung ist der vollkommene Verzicht auf einen technischen Antrieb in Form eines mechanisch erzeugten Luftstroms. Dieser resultiert allein aus dem durch die Beheizung des Heizkörpers erzeugten Konvektionsstrom. Je nach eingestellter Vorlauftemperatur ergibt sich ein unterschiedlich starker Konvektionsstrom durch den Heizkörper.

Im Prinzip fungiert der Heizkörper in diesem Fall wie eine raumseitige Umluft-Komponente, welche zudem durch die Erwärmung der Luft für eine erhöhte Feuchtaufnahme durch die Befeuchtungseinheit sorgt.

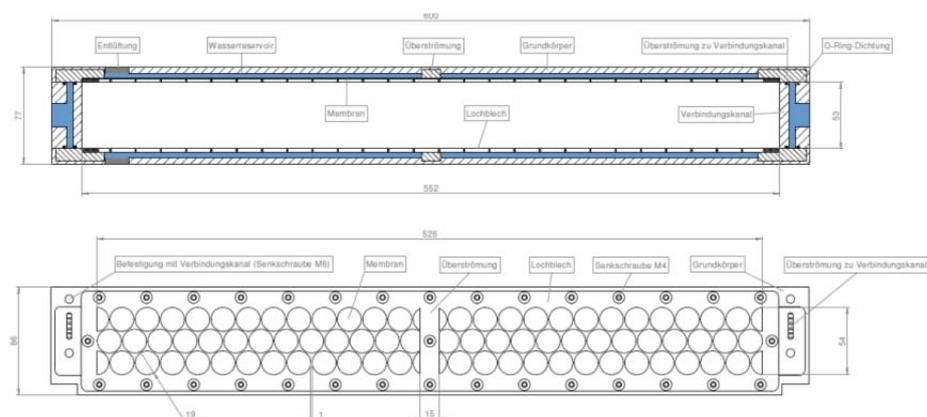


Bild 23:
Horizontal- und Vertikalschnitt des Funktionsmusters 5.

Die wirksame Übertragungsfläche beträgt $0,043\text{m}^2$.

Zielstellung: Dieses Funktionsmuster dient zur Untersuchung einer potentiellen Nutzung als passives dezentrales Befeuchtungselement. Aufgrund des durch den Heizkörper erzeugten Konvektionsstroms kann gänzlich auf eine mechanische Komponente zur Erzeugung des Luftstroms verzichtet werden. Diese Lösung wäre sehr leicht nachzurüsten und durch die direkte Zugänglichkeit und Sichtbarkeit der Übertragungsflächen könnte eine hohe Lufthygiene gewährleistet werden.

3.2.6 Funktionsmuster 6 – Luft zu Luft Befeuchtung

Das Funktionsmuster 6 stellt die Untersuchungsgrundlage für eine Luft-zu-Luft Befeuchtung. Alle bisherigen Funktionsmuster wurden für eine Wasser-zu-Luft Übertragung konzipiert. Da die zu erwartenden Befeuchtungsleistung von einem Luftstrom hoher Feuchte in einen mit niedriger Feuchte als deutlich geringer einzuschätzen ist, musste hierzu die wirksame Membranfläche möglichst groß gestaltet werden.

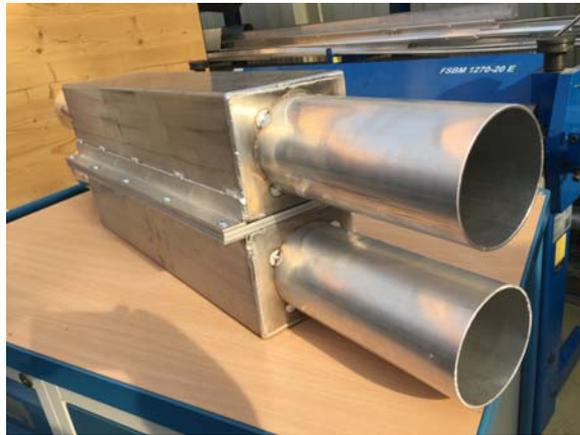


Bild 24:
Horizontal- und Vertikalschnitt des Funktionsmusters 5.

Die Lösung besteht in zwei parallelen Rohrkörpern mit jeweils einem Durchmesser von 100mm die an den zueinander angeordneten Flanke eine Öffnung zur Aufnahme der Membran aufweisen. Die Membran klemmt somit zwischen den beiden Luftströmen und trennt diese voneinander ab. Die Feuchteübertragung findet im Gegenstrom-Prinzip statt, d.h. die jeweiligen Luftströmungen auf der trockenen und feuchten Seite sind entgegengesetzt.

Zielstellung: Untersuchung der Befeuchtungsleistung einer Luft-zu-Luft Übertragung.

3.3 Eingesetzte Messtechnologie

In den unterschiedlichen Versuchsaufbauten wurden Lufttemperatur, Wassertemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit gemessen. Dabei kamen die im Folgenden beschriebenen Sensoren zum Einsatz.

Temperaturmessung

Die Messung verschiedener Temperaturen wird mittels elektrischen Widerstandsthermometern durchgeführt. Bei diesen Messsensoren wird die Eigenschaft von reinen Metalldrähten genutzt, da sich der elektrische Leitungswiderstand in Abhängigkeit der Temperatur verändert. Häufig kommen sogenannte Kaltleiter-Werkstoffe (PTC-Widerstände) zum Einsatz, welche durch einen positiven Temperaturkoeffizienten gekennzeichnet sind. Das bedeutet, der spezifische Widerstand des Werkstoffes steigt mit der Erhöhung von Temperatur. Im Gegensatz dazu gibt es Heißeiter-Werkstoffe (NTC-Widerstände) bei denen der spezifische Widerstand mit steigender Temperatur sinkt und somit einen negativen Temperaturkoeffizient aufweist. Die Widerstandsänderung entspricht also einem Maß für die vorhandene Temperatur. Das Messprinzip basiert auf der Wechselwirkung des Widerstand-Temperatur-Verhaltens. Durch einen nahezu linearen Verlauf der Temperaturabhängigkeit vom Widerstand und einem breiten Messbereich werden in der MSRT vorwiegend Kaltleiter aus Platin (Pt) oder Nickel (Ni) als Thermometerwicklungen eingesetzt. Der Normmesswiderstand ist mit Pt 100 definiert, die Widerstandsänderung beträgt hierbei $0,4 \Omega$ pro $^{\circ}\text{C}$ Temperaturänderung. Die Bezeichnung des Normmesswiderstandes leitet sich die aus dem chemischen Symbol des Messwiderstandes Platin und aus dem Widerstand von 100Ω ab [Tkotz 2009, S.179].



Bild 25:
Foto eines verwendeten Tauchfühler-Tempersensors (Maße in mm)
[Eigene Darstellung].

Feuchtemessung

Für die Messung der Luftfeuchtigkeit werden Kapazitäts-Hygrometer eingesetzt. Diese Geräte arbeiten nach dem Messprinzip der kapazitiven Abtastung und erfassen die Veränderung physikalischer Eigenschaften eines hygroskopischen Materials bei Wasseraufnahme bzw. -abgabe. Der Aufbau ist vergleichbar mit einem Plattenkondensator, da sich eine sehr dünne, feuchtempfindliche Folie (Polymerschicht) zwischen zwei Elektroden befindet. Dadurch bildet sich in diesen System ein feuchteabhängiger Kondensator. Die Polymerschicht entspricht einem Dielektrikum. Bei diesem dielektrischen Messverfahren stellt die Kapazitätsänderung ein Maß für die relative Feuchte der Umgebungsluft dar. Je

höher die Feuchtigkeit der Luft, desto höher ist auch deren elektrische Leitfähigkeit und die resultierende Zunahme der Dielektrizität. Eine hohe Luftfeuchtigkeit führt zu einer hohen Dielektrizitätszahl und somit zu einer Steigerung der Kapazität. Die Veränderung der Kapazität wird mit einem Spannungswandler gemessen. Dabei entsprechen die Messwerte von 0 bis 1 Volt der Größe von relativer Luftfeuchtigkeit zwischen 0 und 100 Prozent. Zusätzlich wird bei kapazitiven Feuchtesensoren durch ein integriertes elektrisches Widerstandsthermometer auch die Lufttemperatur gemessen [Heinrich 2005, S.38].

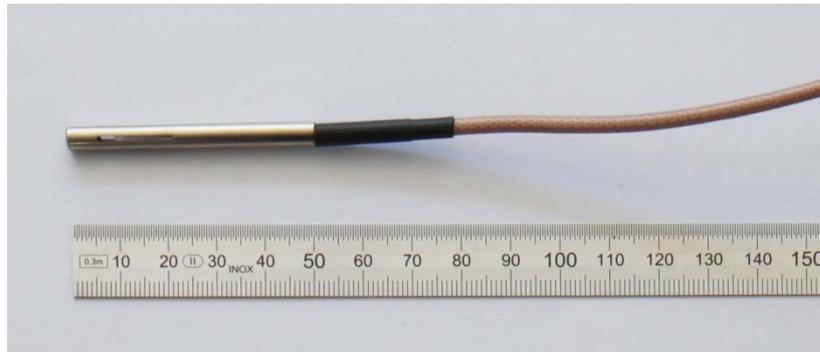


Bild 26:
Foto eines verwendeten kapazitiven Feuchtefühlers (Maße in mm)
[Eigene Darstellung].

Die kapazitiven Feuchtesensoren wurden kalibriert, um abschätzen zu können, wie hoch die Messgenauigkeit ist (Bild 27). In dem Bereich zwischen 20 und 90 Prozent relative Luftfeuchte sind kapazitive Fühler zuverlässig, darüber hinaus muss jedoch mit größeren Ungenauigkeiten gerechnet werden. In den folgenden zwei Diagrammen sieht man, dass zwei Temperaturniveaus gewählt wurden (23 °C und 10 °C). Die Temperaturerfassung der Fühler ist sehr genau, so dass die maximale Differenz der vorherrschenden und gemessenen Temperatur 0,24 °C beträgt.

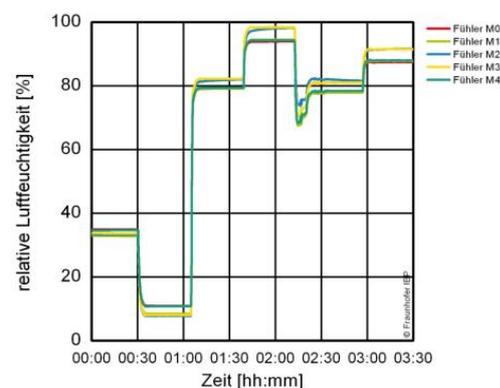


Bild 27:
Kalibrierung der Feuchtesensoren.

Die Ergebnisse der Kalibrierung der Feuchtesensoren liegen stärker auseinander. Es wird eine definierte relative Feuchte bei einer festen Temperatur 30 Minuten lang gehalten. Gemessen wurde bei 23 °C die relative Feuchte von 35 Prozent, 10 Prozent, 80 Prozent und 97 Prozent, bei 10 °C wurden 80 Prozent und 90 Prozent gemessen. Wie bereits vermutet sind die größten Messunterschiede der Sensoren bei hoher Luftfeuchtigkeit entstanden. Bei 97 Prozent relativer Feuchte haben wir zwischen Fühler M1 und M3 eine maximale Differenz von 4,5 Prozent. Da die zu erwartenden Feuchteunterschiede zum Teil eher klein ausfallen können sind solche Ungenauigkeiten zu berücksichtigen bzw. in den Ergebnissen zu korrigieren.

Luftgeschwindigkeitsmessung

Zur Luftgeschwindigkeitsmessung wurden Hitzdrahtanemometer genutzt (Bild 28). Dazu wird ein Draht elektrisch erhitzt. Durch die vorbeiströmende Luft findet eine Wärmeabgabe des Drahtes statt, welche zur Luftgeschwindigkeitsbestimmung herangezogen wird. Der eingesetzte Hitzdraht sollte einen möglichst hohen Temperaturbeiwert aufweisen. Meist werden Drähte aus Platin, Nickel oder Wolfram-Legierungen verwendet. Die Umgebungstemperatur muss zusätzlich gemessen und kompensiert werden.

Der Messbereich bei Hitzdrahtanemometer liegt zwischen 0 und 2 m/s und die Ansprechschwelle liegt unter 0,01 m/s. Somit können auch kleine Luftströmungen sehr genau bestimmt werden. Jedoch sind die Fühler mechanisch empfindlich. Daher können Verschmutzungen die Messung beeinträchtigen und zu Fehlern führen.

Der verwendete Draht hat meist einen Durchmesser von 2,5 bis 10 Mikrometer und ist mindestens zweihundertmal so lang wie breit, um Randeinflüsse zu minimieren. Die Messung erfolgt richtungsunabhängig.

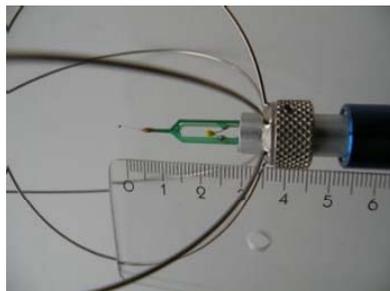


Bild 28:
Abbildung einen der verwendeten Hitzdrahtanemometer.

Die Messdaten werden mithilfe eines ALMEMO-Datenloggers der Firma Ahlborn erfasst und gespeichert.

Durchflussmessung

Die Messung der Durchflussmengen erfolgt mittels eines magnetisch-induktiven Durchflusssensors (MID). Bei diesem Verfahren wird die Strömungsgeschwindigkeit eines elektrisch leitenden Mediums in einem definierten Rohrdurchmesser gemessen. Folglich kann die Durchflussmenge berechnet werden. Basierend auf dem faradayschen Induktionsprinzip nutzt ein MID die Trennung von Ladungen in einem magnetischen Feld. Der Durchflusssensor besteht aus einem Magneten, zwei Elektroden und einem nicht leitenden Rohr. Mittels Spulen wird von außen ein zum Rohr senkrecht angeordnetes Magnetfeld erzeugt. Die im durchströmenden Medium vorkommenden ionischen Ladungsträger werden infolge des magnetischen Feldes gegen die Rohrwand abgelenkt. Zur Erfassung der induktiv erzeugten Spannungsdifferenz sind quer zum magnetischen Feld Elektroden angeordnet. Die gemessene Spannung als Folge der Ladungstrennung ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und wird in ein elektrisch nutzbares Signal umgewandelt. Um das Signal auswerten und weiterverarbeiten zu können wird anhand der nachgeschalteten Leistungselektronik die Durchflussmenge berechnet und in einem Bereich von 4 bis 20 mA analogisiert [Recknagel 2008, S.296].



Bild 29:
Foto des verwendeten magnetisch-induktiven Durchflusssensors (Maße in mm)
[Eigene Darstellung].

Particle Image Velocimetry (PIV)

Für die Ermittlung der Konvektionsströmung am Heizkörper für das Funktionsmuster 5 bedarf es einer speziellen Messtechnik, die es erlaubt diesen Konvektionsstrom in Volumen und Geschwindigkeit zu bestimmen ohne diesen durch die verwendete Messtechnik selbst zu beeinflussen. Particle Image Velocimetry (PIV) ist im Bereich der Strömungsmechanik eine Methode zur Messung des Strömungsfeldes eines sich bewegenden Fluids. Anders als herkömmliche Messinstrumente die Geschwindigkeitsmessungen an einem Punkt oder entlang einer Linie aufnehmen, ist PIV ein nicht-intrusives Messverfahren bei dem die zu untersuchende Strömung nicht gestört wird. Hierbei wird der zu messenden Strömung ein „Seeding“ beigemischt und die Geschwindigkeit dieser Partikel gemessen. Um ein möglichst realistisches Szenario abbilden zu können, sollte das „Seeding“ hinsichtlich seiner physikalischen Strömungseigenschaften möglichst ident zum realen Fluid sein. Das bedeutet, die Partikel sollten einerseits eine geringe Trägheit aufweisen, um etwaigen Strömungsänderungen rasch folgen zu können. Andererseits sollte das „Seeding“ eine ähnliche Dichte wie

Luft haben, um möglichst auftriebsneutral zu sein. In der Regel werden als Partikel feinerstäubte Öltröpfchen, wie z. B. DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat), verwendet. Über einen Aerosolgenerator wird das „Seeding“ in die zu messende Strömungsregion eingebracht. Um die Partikel sichtbar zu machen wird ein Laser eingesetzt, welcher mittels Lichtschnittoptik in eine vertikale Fläche aufgefächert wird. Für den Einsatz von Lasern als Lichtquelle sprechen einerseits die sehr hohen Energiedichten und andererseits die exakte Wellenlänge, mit der das Licht bereitgestellt wird. Der für PIV-Messungen relevante Laser ist üblicherweise ein Nd:YAG-Laser (Neodym-Yttrium-Aluminium-Granat) und arbeitet durch Frequenzverdoppelung mit einer Wellenlänge von 532 nm. Durch das monochromatische Licht werden Abbildungsfehler, die dadurch entstehen, dass Licht unterschiedlicher Wellenlängen an Linsen in verschiedene Richtungen gebrochen wird, verhindert. Neben der messtechnischen Anwendung wird dieser Festkörperlaser, z. B. auch im Bereich der Materialbearbeitung, als thermisches Trennverfahren von Materialien (Laserstrahlschneiden), verwendet. Anhand des doppelt-gepulsten Lasers werden die reflektierenden Ölteilchen innerhalb eines kurzen Zeitintervalls zweimal beleuchtet. Die Zeit zwischen den zwei Bildern wird in Abhängigkeit von der zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeit eingestellt und liegt meist im Bereich von Mikrosekunden. Während der beiden Laserpulse wird zeitgleich die Lichtstreuung der Partikel im Messbereich von einer hochauflösenden Kamera erfasst und es entstehen Bildpaare, da jede Belichtung des Lasers eine eigene Aufnahme darstellt. Für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit sind somit die Positionen der Seedingpartikel auf den Doppelbildern zu unterschiedlichen Zeitpunkten definiert. Um die Verschiebung der Partikel zu ermitteln, wird eine Kreuzkorrelationsanalyse durchgeführt. Hierbei wird durch die diskrete Kreuzkorrelationsfunktion der Ort des Maximums für den Verschiebungsvektor angezeigt, bei dem die Übereinstimmung zwischen den Teilbildern am größten ist. Mit Hilfe dieses Verschiebungsvektors und einer räumlichen Kalibrierung können nun die Geschwindigkeitskomponenten durch die Software berechnet werden. Resultierend kann aus Zeitversatz und räumlicher Verschiebung der Partikel die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids bestimmt werden. Bild 30 zeigt den schematischen Versuchsaufbau einer PIV-Messung.

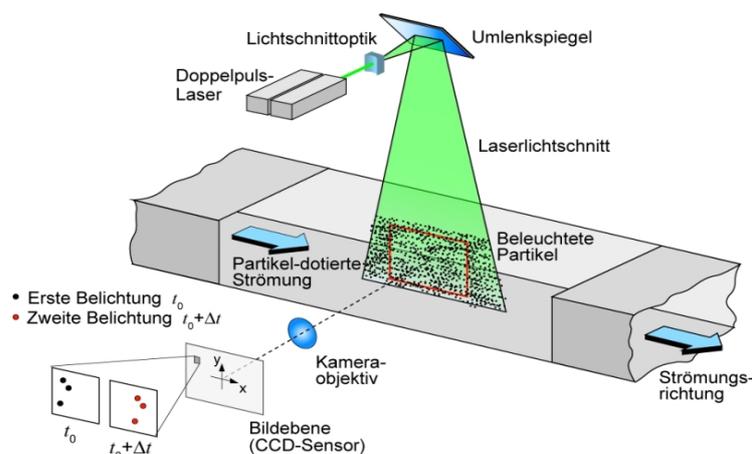


Bild 30:
Schematisches Messprinzip PIV.

Zur Durchführung von PIV-Messungen ist die Berücksichtigung einiger sicherheitstechnischer und messtechnischer Aspekte von besonderer Relevanz. Um eine hohe Qualität der Messergebnisse zu erreichen, muss auf eine entsprechende Vorbereitung von Versuchsraum und Messobjekt Wert gelegt werden. Unerwünschte Reflexionen im Aufnahmebereich sind eine häufige Fehlerquelle und können die Ergebnisse merklich verfälschen. Deswegen sind hoch absorptive (matte, schwarze) Oberflächen der Umgebung und des Messobjektes notwendig. Demzufolge werden in den meisten Fällen die Umschließungsflächen mit schwarzem Molton ausgekleidet. Die hauptsächliche Begründung für die Verwendung von Molton ist jedoch die Reduktion der drohenden Strahlungsgefährdung infolge des Lasers. Durch die Abtrennung des Aufenthalts- vom Messbereich durch einen schwer-entflammaren Bühnenvorgang aus Molton (Brandschutzklasse B1) wird die Strahlungsgefährdung bei laufendem Laserbetrieb reduziert. Außerdem sind entsprechende Schilder und Warnleuchten in den Außenbereichen des Versuchsraumes anzubringen, um außenstehende Personen auf den laufenden Laserbetrieb hinzuweisen. [25-Lauss, 31f].

3.4 Versuchsaufbauten

3.4.1 Emissionsprüfkammer - VCE1000

Die ersten Messungen wurden in einer Emissionsprüfkammer (EPK) durchgeführt (siehe Bild 31). Diese müssen besonders hohen Anforderungen gerecht werden, da in solchen Kammern normalerweise die Emissionsabgabe von Baumaterialien geprüft wird. Im Besonderen steht die Luftdichte im Vordergrund. Die EPK hat ein Volumen von 1 m³, in der sich bestimmte Randbedingungen – i. d. R. Temperatur, Luftwechsel und Raumluftfeuchte – regulieren lassen. Die Innenwände bestehen aus electropoliertem Edelstahl und puffern somit keine Feuchte. Außerdem fungiert ein zusätzlicher Luftmantel zwischen dem inneren Prüfraumbehälter und dem äußeren Mantel als Wärmedämmschicht. Ein Ventilator zur Luftumwälzung ist in die Kammerrückwand integriert. Die Lüftungsleistung lässt sich zwischen 25 und 100 Prozent variieren. Weiterhin ist zu erwähnen, dass die Klimakammer mit getrockneter Reinstdruckluft (mit Aktivkohlenfilter gereinigt) arbeitet. Diese wird in einem separaten Raum mithilfe eines Kompressors aus der Außenluft gewonnen. Durch eine spezielle Prozedur wurde sichergestellt, dass die Startbedingungen für alle folgenden Untersuchungen immer 20°C Lufttemperatur und 20 Prozent relative Luftfeuchte betragen haben.



Bild 31:
Abbildung der Emissionsprüfkammer - VCE1000 und Lauda Wasserumlaufkühler.

Daten der Messkammer:

- Freier Prüfraum V: 1000 l \pm 20 l
- Leckrate: 2 mbar • l/sec
- Frischluft: max. 4 m³/h
- Temperaturspanne: 20 °C - 130 °C
- Feuchte: 30 % - 95 % r. F.
- Taupunktbereich: 5 °C bis 60 °C
- Feuchteabweichung zeitl.: \pm 1 – 3 % r. F.
- Kühlen: 0,3 K/min
- Heizen: 0,4 K/min

Um das Wasser konstant temperieren zu können, wurde es mithilfe eines Wasserumlaufkühlers (Lauda WKL 230) durch das System gepumpt (siehe Bild 32). Er hat einen Toleranzbereich von \pm 0,5 °C und ein maximales Fassungsvermögen von 6 Liter Flüssigkeit. Der Kühler kann nur mit voll entsalztem Wasser betrieben werden. Die Temperatur wurde in dem Wasserbehälter gemessen und bei Bedarf gekühlt. Der maximale Pumpenförderstrom liegt maximal bei 8 l/min, es entsteht ein Förderdruck von maximal 0,15 bar.

Der gesamte Messaufbau ist aus Bild 32 ersichtlich. Der Probekörper wird aufrecht in der Messkammer platziert, um sicherzustellen, dass immer vollflächig Wasser an der Membrane ansteht. Zur Messwerterfassung werden 5 kapazitive Feuchtefühler (M0-M4) verwendet. Die Positionierung ist aus Bild 32 ersichtlich. Der Fühler M4 ist außerhalb der Messkammer platziert, um auch die Umgebungsbedingungen mit zu erfassen.

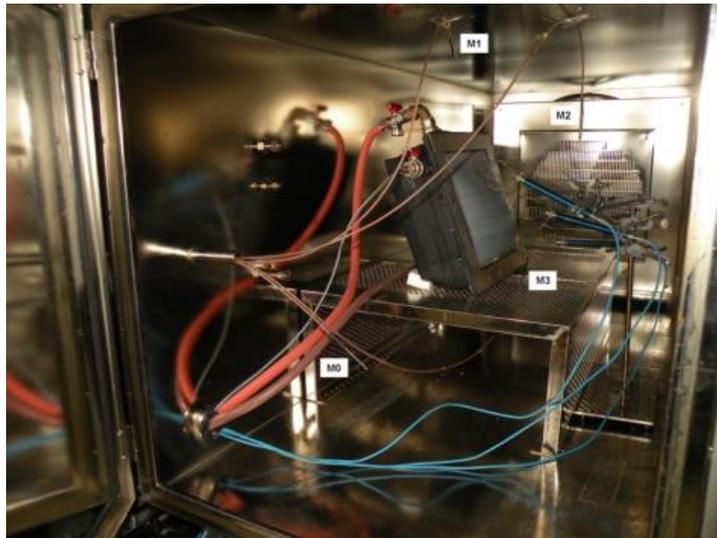


Bild 32:
Messaufbau in Klimakammer für Funktionsmuster 1 und 2.

Die Klimakammer hat ein Volumen von 1 m^3 . Wenn man jedoch die durch Flansch, Metallablage und Rohre verlorene Volumen abzieht, ergibt sich ein freies Volumen von $0,985 \text{ m}^3$.

Somit ergibt sich ein Flächen zu Volumenverhältnis von $0,06765 \text{ m}^2 : 0,985 \text{ m}^3$, was umgerechnet ein Verhältnis von 1 m^2 Fläche zu $14,560 \text{ m}^3$ Volumen bedeutet. Um die Luft von 20 Prozent relative Feuchte auf 90 Prozent bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ zu befeuchten, sind $10,5 \text{ g}$ Wasser pro Kubikmeter nötig. Unsere EPK hat ein Volumen von $0,985 \text{ m}^3$. Folglich muss $10,34 \text{ g}$ Wasser durch die Membran diffundieren, um diese Feuchte zu erreichen.

3.4.2 Versuchsaufbau zur zentralen Luftbefeuchtung

Der zweite Versuchs- und Messaufbau wurde für das Funktionsmuster 3 geplant und realisiert. Er besteht aus einer technischen Anlage, welche sowohl einen Luftstrom mit konstanten Volumen erzeugt, es gleichzeitig aber auch ermöglicht diesen hinsichtlich der Luftfeuchte und Temperatur variabel zu konditionieren.

Für die gewünschte Versuchsdurchführung wurde grundsätzlich immer die gleiche Ausgangskonditionierung von etwa 20 Prozent relativer Luftfeuchte und 20°C Lufttemperatur gewählt. In den weiteren Untersuchungsszenarien mussten dann Variationen dieser Basiskonditionierung hinsichtlich des Volumensstroms, der Lufttemperatur und der Wassertemperatur im Befeuchter realisiert werden. Die Ausgangsfeuchte sollte jedoch immer bei 20 Prozent relativer Feuchte liegen, um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu sichern.

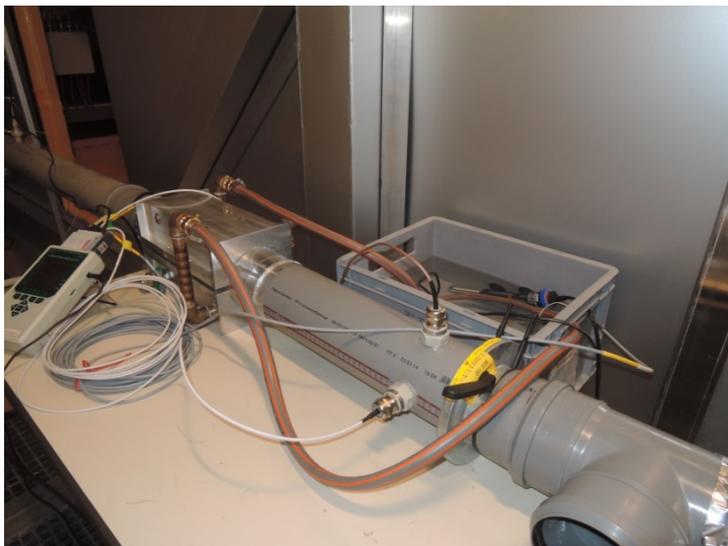


Bild 33:
Messaufbau zur Untersuchung der Befeuchtungsleistung in zentralen Lüftungsanlagen.

Neben der technischen Komponente zur Bereitstellung der konditionierten Zu-
luft musste zudem noch eine Vorrichtung erstellt werden, um die Funktions-
muster mit dem notwendigen Wasser zur Befeuchtung zu versorgen, sowie die
Wassertemperatur innerhalb der Befeuchtungskomponente auf dem ge-
wünschten Niveau zu halten.

Bild 33 zeigt diese Anordnung mit einem externen Wasserbecken, den Versor-
gungsschläuchen zum Befeuchter sowie der kapazitiven Feuchtesensoren im
Lüftungskanal vor und nach der Befeuchtungskomponente.

Zudem befand sich im Wasserreservoir eine Heizeinheit, die zum einen dafür zu
sorgen hatte, die Wassertemperatur aufgrund der Wärmeverluste durch den
Verdunstungsprozess konstant zu halten und zum anderen es auch ermöglicht,
diese im Zielwert zu variieren. Die Regelung erfolgte anhand eines Temperat-
urfühlers direkt im Wasserreservoir hinter der Befeuchtungsmembran, um den
Einfluss der Wegstrecke und dort auftretender Wärmeverluste auszuschließen.

Zur Ermittlung wichtiger Leistungskennwerte der Membranlösung in Funkti-
onsmuster 3 sowie der Einflüsse von Wassertemperatur und Luftvolumenstrom
erwies sich der Aufbau als gut geeignet. Jedoch hat sich gezeigt, dass es mit
der verfügbaren technischen Anlage nicht möglich war, die Ausgangskonditio-
nierung der Luft über längere Zeiträume konstant zu halten. Es traten immer
wieder Schwankungen auf, welche es nicht möglich machten, valide Aussagen
zum Langzeitverhalten zu generieren.

3.4.3 Versuchsaufbau zur Untersuchung der Langzeitwirkung sowie des Einflusses unterschiedlicher Wasserqualitäten

Aus diesem Grund wurde ein weiterer Versuchs- und Messaufbau gewählt. In diesem Fall wurde der Aufbau in Kombination mit dem Indoor Air Test Center (IATC) des Fraunhofer IBP realisiert, welches eine sehr aufwendige Luftkonditionierung vorhält, da hier neben Untersuchungen von Lüftungssystemen auch Filterprüfungen und chemische Luftanalysen durchgeführt werden.

Das IATC verfügt neben der Anlage zur Luftkonditionierung noch über einen daran angeschlossenen Prüfraum, welcher vor allem für die Untersuchung des Funktionsmusters 5 von entscheidender Bedeutung war, jedoch gesondert im diesbezüglichen Messaufbau noch einmal beschrieben wird.



Bild 34:
Messaufbau zur Untersuchung der Langzeitwirkung.

Für diesen Aufbau wurde das Funktionsmuster 4 hinter die Anlage zur Luftkonditionierung platziert und ebenfalls mit einem externen und gedämmten Wasserreservoir verbunden. Um die Temperatureinflüsse von außen zu minimieren wurde der gesamte Aufbau für die Messwerterfassung zusätzlich abgedämmt. Alle Messwerte wurden jedoch direkt im Luftstrom vor und nach der Befeuchtungskomponente ermittelt, um die Fehlereinflüsse zu minimieren. Hinsichtlich der Messung der Luftfeuchte nach der Befeuchtungskomponente wurde ein entsprechend notwendiger Abstand in ersten Testreihen ermittelt, um eine ausreichende Abmischung der befeuchteten Luft nach der Komponente zu sichern. Man musste davon ausgehen, dass die Luft sich zunächst vor allem in den Randbereichen und damit den Kontaktflächen zur Membran anfeuchtet und sich erst durch weitere Verwirbelung eine homogene Feuchte im Luftstrom für eine gesicherte Messung einstellt. Hierzu wurde an unterschiedlichen Positionen und Abständen zur Komponente sowohl in den Randbereichen wie auch in der Strömungsmitte gemessen. Der Messpunkt wurde dann dort platziert, wo keine Unterschiede mehr in den Werten aufgetreten sind und somit eine ausreichend gute Vermischung gewährleistet war.

3.4.4 Versuchsaufbau zur Dezentralen Luftbefeuchtung

Zur Untersuchung und Ermittlung der Leistungskennwerte der dezentralen Komponente wurde der Messraum des IATC verwendet (Bild 35).



Bild 35:
Klimakammer IATC zur Untersuchung des dezentralen Funktionsmusters 5.

Der Raum mit den Abmaßen 8,25 m x 5,07 m x 3,12 m (L x B x H) bildet eine Grundfläche von 41,8 m² bzw. ein Raumvolumen von 130,5 m³. Dies repräsentiert in etwa einen Arbeitsplatz für 4 Personen. Die Besonderheit des Raumes stellt die Tatsache dar, dass die einzelnen abgebildeten Felder mit unterschiedlichen Temperaturen beaufschlagt werden können. Somit ist es möglich eine bestimmte Gebäudesituation mit entsprechendem Wärmeverlust abzubilden, um dem Raum eine Heizlast aufzuprägen, die jederzeit reproduziert werden kann. Somit konnten realitätsnahe Bedingungen für den Betrieb eines üblichen Heizkörpers geschaffen werden, um im vorgegeben Heizbetrieb die Raumtemperatur konstant zu halten und die Befeuchtungsleistung des Funktionsmusters 5 ermitteln zu können. Wie in Kapitel 1.3.2 ausgewiesen, hängt die Befeuchtungsleistung von den Faktoren des Volumenstroms sowie der Wasserabgabemenge ab, so dass es notwendig ist, diese exakt zu bestimmen. Zur Bestimmung des Volumenstroms wurde die zuvor beschriebene Messmethode PIV mit unterschiedlichen Startbedingungen der Vorlauftemperaturen des Heizkörpers verwendet.

Der Heizkörper wird von außen über einen Heizwasserpuffer versorgt. Die Zuführungen zum Heizkörper sind gedämmt, um keine zusätzliche Heizleistung neben dem Heizkörper selbst in den Raum einzubringen. Über einen elektrischen Heizstab sowie der notwendigen Temperaturfühler und Regelkreise wurde eine vorgegebene Vor- und Rücklauftemperatur eingestellt und konstant gehalten (Bild 36).

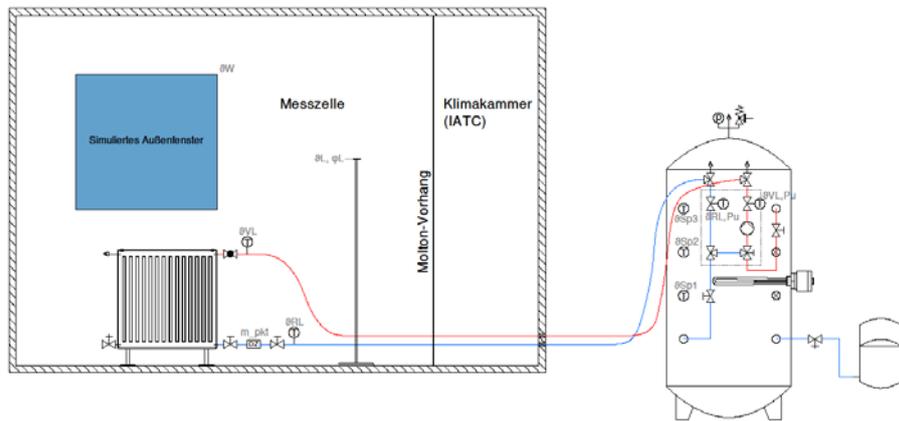


Bild 36:
Messaufbau zum Betrieb des Heizkörpers in der Messkammer.

Das Funktionsmuster 5 selbst wurde wie in den Lösungen zuvor über ein separates und gedämmtes Wasserreservoir versorgt, welches über ein im Wasser befindliches Heizelement auf der entsprechenden Solltemperatur gehalten wurde. Die Regelgröße der Wassertemperatur wurde wie zuvor direkt im Wasservolumen des Funktionsmusters unmittelbar hinter der Membran bestimmt.

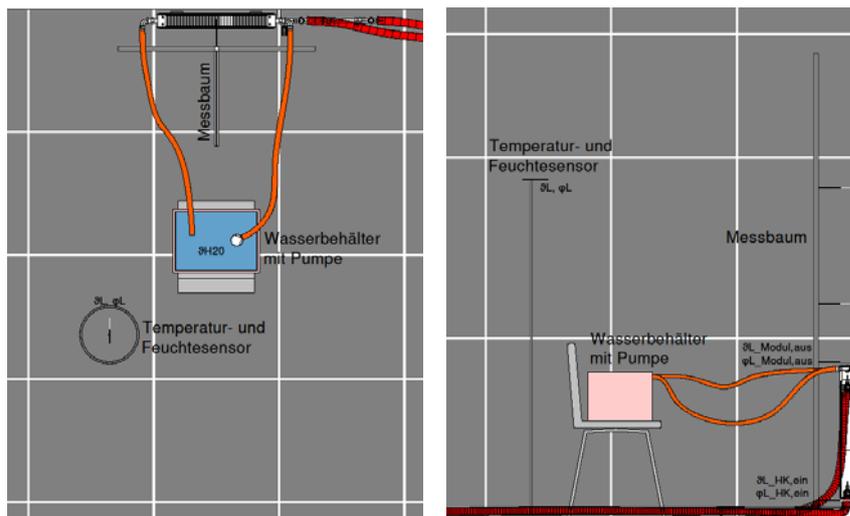


Bild 37:
Messaufbau zum Betrieb des Funktionsmusters 5.

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der Auswirkungen der Befeuchtungskomponente auf den gesamten Raum und dessen Luftvolumen, so dass zu dessen Erfassung mehrere Messpunkte im Raum verteilt wurden.

Zur Bestimmung der Befeuchtungsleistung des Funktionsmusters 5 sind zwei Anwendungsszenarien umzusetzen. Einmal die reine Befeuchtungsleistung in Bezug auf ein abgeschlossenes Raumluftvolumen, um den Gradienten der Befeuchtung zu bestimmen und einmal den realistischen Anwendungsfall eines Luftwechsels von 0,6/h, welcher den Raum kontinuierlich mit trockener frischer

Luft beaufschlagt. Hierzu wurde eine zusätzliche Lüftungseinheit mit der Zuführung der trockenen Zuluft sowie der Ableitung der anfallenden Fortluft installiert.

3.4.5 Versuchsaufbau zur Luft-zu-Luft Befeuchtung

Der Messaufbau zur Bestimmung der Befeuchtungsleistung des Funktionsmusters 6 wird erneut mit der technischen Anlage der ersten Prüfung des Funktionsmusters 3 durchgeführt. Zwar können in diesem Aufbau wie bereits dargestellt, die Randbedingungen nicht über längere Zeiträume konstant gehalten werden. Da es in dieser Untersuchung jedoch nicht um die Langzeitwirkung, sondern lediglich um die Leistungsbestimmung geht, ist diese Einschränkung akzeptabel.



Bild 38:
Messaufbau zum Betrieb des Funktionsmusters 6.

Im Falle der Luft-zu-Luft Übertragung bedarf es einer zusätzlichen Lüftungskomponente, welche die feuchte Luftseite vorhält. Hierzu wurde eine zweite Anlage mit entsprechender Luftbefeuchtungseinheit ergänzt. Die Durchströmung der Komponente erfolgt im Gegenstrom-Prinzip, d.h. die beiden Luftströmungen sind an der Ein- und Austrittsöffnung der jeweiligen Seite entgegengesetzt.

3.4.6 Versuchsaufbau zur Beurteilung der Lufthygiene

Der Versuchsaufbau zur Beurteilung der Lufthygiene wird in einem eigenen Abschnitt (Kapitel 4.8) zusammen mit den jeweiligen Ergebnisse beschrieben.

4 Messreihen und Ergebnisse

4.1 Orientierende Vorversuche in der Emissionsprüfkammer

In den orientierenden Vorversuchen in der Emissionsprüfkammer wurde zunächst anhand des Funktionsmusters 1 die VANADion[®]-Membran untersucht.

Die Startbedingungen für diese Messreihe wurden wie folgt festgelegt:

- Lufttemperatur: 20 °C
- Wassertemperatur: 20 °C
- Ventilatorleistung: 80 %,
- Luftwechsel: $\leq 0,007/h$

Diese Bedingungen wurden für die erste Messreihe mit der Variation eines zirkulierenden bzw. eines nicht nacherwärmten Wasserreservoirs konstant gehalten.

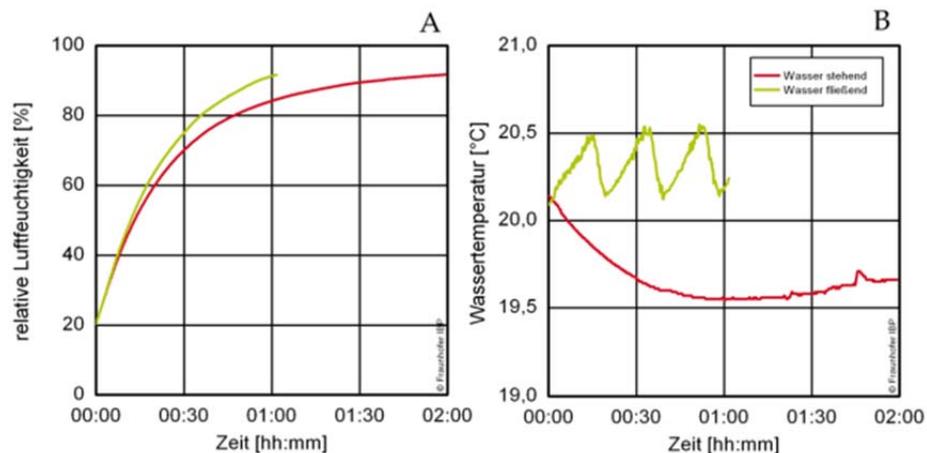


Bild 39:

Relative Luftfeuchtigkeit (A) und Wassertemperatur (B) bei der Variation von stehendem und fließendem Wasser an der Membraninnenfläche.

Man kann gut erkennen, dass die Wassertemperatur aufgrund des Phasenübergangs abkühlt (Bild 39-B) und somit Wärmeenergie aus dem Befeuchtungswasser gezogen wird. Dies ist für eine technische Verwertung von Bedeutung, da es bei üblichen Befeuchtungslösungen einen zusätzlichen Aufwand erfordert, die durch die direkte Einbringung des Wassers in den Luftstrom abgekühlte Luft erneut auf die Solltemperatur der Zuluft zu erwärmen. Könnte, wie hier zu vermuten, die notwendige Wärmemenge für den Phasenübergang über das Befeuchtungswasser bereit gestellt werden, wäre dies deutlich einfacher und kostengünstiger umzusetzen. Aus diesem Grund wird dieser Effekt in den weiteren Versuchen genauer untersucht. Der Unterschied in der Befeuchtungsleistung ist im linken Bild gut erkennbar und hängt aufgrund der Funktionsweise der Membran vermutlich eher mit der Temperatur des Wassers als mit dessen Zirkulation zusammen (Bild 39-A). Auch dies soll in weiteren Versuchen präzisiert werden.

Deshalb wurde im zweiten Messdurchlauf zunächst die Wassertemperatur variiert, um festzustellen, inwieweit sich dies auf die Befeuchtungsleistung auswirkt.

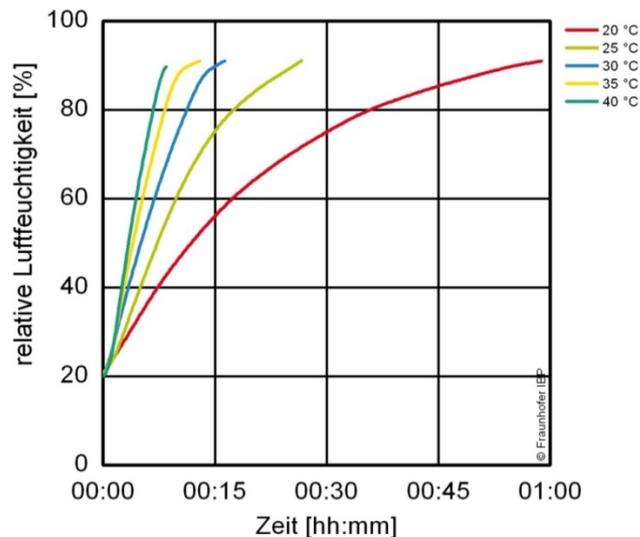


Bild 40:
Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Anstieg der Wassertemperatur.

Man kann gut erkennen, dass die Befeuchtungsleistung durch die Wassertemperatur beeinflusst wird (Bild 40). Somit ergibt sich die Möglichkeit einer Regelung der Befeuchtungsleistung über die Wassertemperatur. Zudem kann man erkennen, dass bereits bei 20°C Wassertemperatur, also ohne einen Temperaturunterschied zur Lufttemperatur eine signifikante Befeuchtungsleistung vorhanden ist. Gleichzeitig deutet der extrem schnelle Anstieg der relativen Feuchte in der Emissionsprüfkammer auf ein aus Sicht der industriellen Verwertung sehr hohes Leistungspotential hin.

4.2 Vergleichende Messung textilbasierter Membranmaterialien

Zunächst wurde im Vergleich eine textilbasierte Membran untersucht. In diesem Fall wurde GORE-Tex® verwendet. Entsprechend der technischen Beschreibung müsste die Membran ein ähnliches Verhalten aufweisen. Aufgrund unterschiedlicher Materialproben, die uns zur Verfügung standen, wurde ein eigenes Funktionsmuster gebaut (Funktionsmuster 2). Es weist in Abweichung zur VANADion® Variante eine etwas kleinere Fläche auf. Die Fläche der Membrane ist kreisförmig zugeschnitten, die aktive Fläche beträgt wie beschrieben 0,0143 m².

Die Startbedingungen wurden identisch zur ersten Versuchsreihe gesetzt und die Unterschiede in der wirksamen Befeuchtungsfläche des Funktionsmusters 2 zum Funktionsmuster 1 in der Ergebnisdarstellung berücksichtigt und angepasst. Betrachtet man die Messergebnisse ist zu erkennen, dass der Gradient aus dem Anstieg der relativen Feuchte und der dafür notwendigen Zeit etwas schlechter ausfällt als im Fall der VANADion®-Variante, jedoch ebenfalls mit gutem Nutzungspotential (Bild 41).

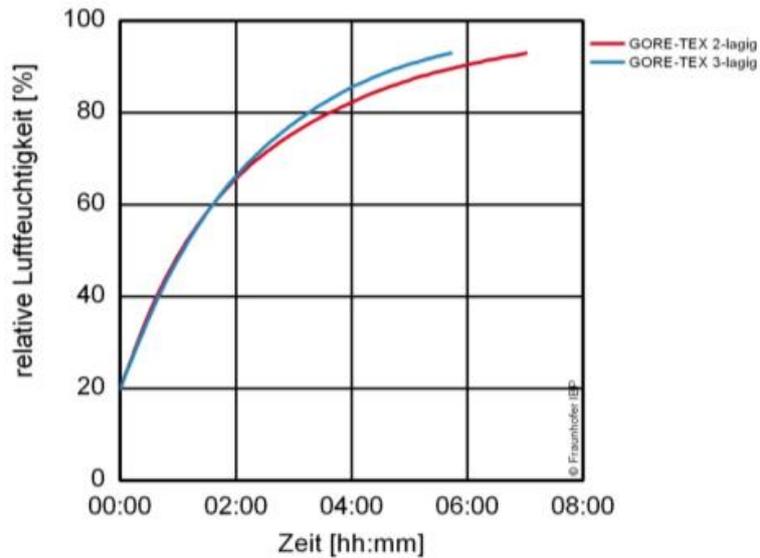


Bild 41:
Relative Luftfeuchte der Messung zwei GORE-Tex® Membrane.

Gegen Ende des Messzyklus bildeten sich jedoch auf der Oberfläche kleine Tropfen (Bild 42). Dies konnte in keiner der zuvor durchgeführten Messungen bei VANADion® beobachtet werden.



Bild 42:
Tropfenbildung an der Oberfläche der GORE-Tex® Membran.

Da in einer üblichen Anwendung zur Luftbefeuchtung damit zu rechnen ist, dass sich an den Tropfen Substrat aus dem Luftstrom ablagern kann, ist dies aus lufthygienischer Sicht nicht akzeptabel. Die Ursachen liegen in der grundsätzlich anderen Wirkfunktion. GORE-Tex® ist eine Porenmembran und kann deshalb bei geringem Antrieb offensichtlich den Wasserfluss nicht ausreichend „abregeln“. Wenn die Wasserabnahme auf der Luftseite abnimmt, dringt weiter ähnlich viel Wasser durch die Poren und bildet die beobachteten Tropfen auf der Oberfläche. Daher scheidet diese Lösung für die weiteren Untersuchungen aus.

Als weitere Variante wird Tyvek® als Lösung aus dem Baukontext untersucht. Tyvek® ist ein Vliesstoff der Firma DuPont, der aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) besteht. Bei der Herstellung werden zwei unterschiedliche Verfestigungsverfahren der abgelegten Feinstfaserschichten angewendet, welches mit Kalandern mit glatten- bzw. mit Gravurwalzen je nach Produkt unternommen werden. So entstehen unterschiedliche Typen von Tyvek®-Materialien, von steifem (z. B. Verpackungen) bis zu weichem Charakter (z. B. Schutzanzüge). Sie wird in vielen Bereichen angewendet, von Schutzanzügen über Dachabdichtungen bis zu Versandtaschen.

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (sd-Wert) der unterschiedlichen Tyvek®-Typen ist dementsprechend unterschiedlich hoch. Die diffusionsoffensten Varianten liegen ungefähr bei 0,02 und 0,03 m im Schnitt und befinden sich damit in etwa im Wertebereich von VANADion® (Bild 43).



Bild 43:
Abbildung einer Tyvek®-Folie.

Die Untersuchungen zu dieser Variante wurden anhand des Funktionsmusters 4 durchgeführt und werden hinsichtlich der Ergebnisse zum besseren Vergleich dort beschrieben.

4.3 Ergebnisse der Befeuchtungsleistung des Funktionsmusters 3 mit VANDion®

Zur Anwendung kam hier der unter 2.4.3 beschriebene Versuchs- und Messaufbau für eine zentrale Befeuchtungskomponente. Durch die rohrförmige Bauweise des Funktionsmusters 3 könnte eine realitätsnahe Anwendung mit einer direkten Durchströmung der Befeuchtungskomponente realisiert werden. Durch eine Rezirkulation bestimmter Raumluftmengen in Form einer Umluft könnte die Wirkung der Komponente hinsichtlich der resultierenden Raumluftfeuchte noch gesteigert werden. Zur Leistungsbestimmung sollte hier jedoch der übliche Praxisfall ohne einen entsprechenden Umluftanteil untersucht werden.

Ziel der Leistungsermittlung war die Messung der Steigerung der relativen Luftfeuchtigkeit vor und nach der Befeuchtung.

Als Startbedingung wurde ein Luftvolumenstrom von 50m^3 mit einer Temperatur von 20°C und einer relativen Feuchte zwischen 15 Prozent und 20 Prozent eingestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit lag bei etwa $1,7\text{m/s}$.

In diesem Zusammenhang wurden etwa 20 Messreihen durchgeführt und ausgewertet. Bild 44 zeigt eine beispielhafte Messreihe mit symptomatischen Werten unter den genannten Startbedingungen.

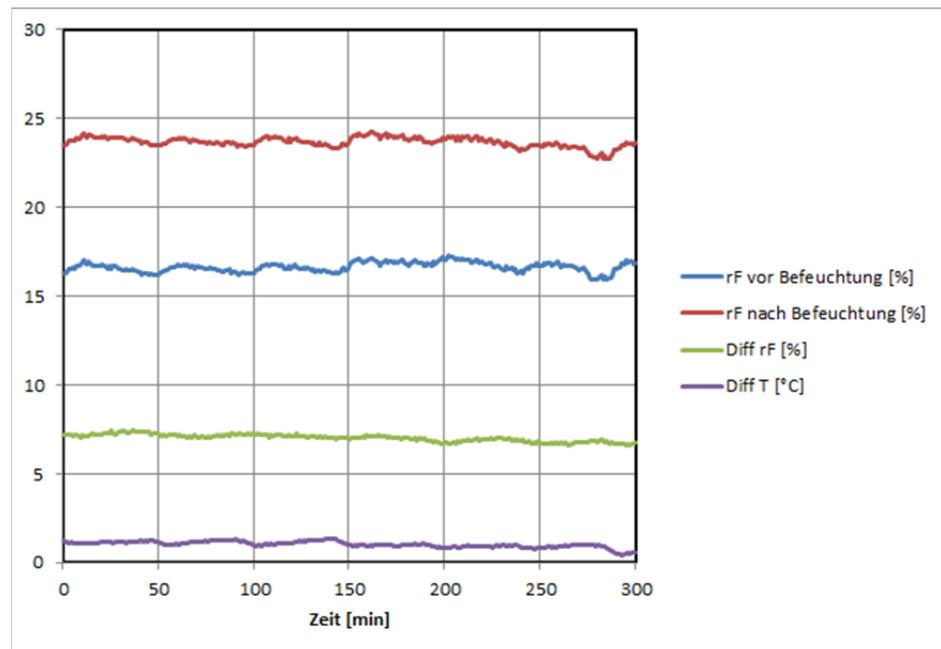


Bild 44:
Messwerte zur zentralen Luftbefeuchtung mit Funktionsmuster 3.

Betrachtet man die Ergebnisse, so ist ersichtlich, dass die erzielbare Befeuchtungsleistung entsprechend den Vorversuchen sehr vielversprechend ist (Bild 44). Die erreichbare Verbesserung der relativen Feuchte liegt im Bereich von etwa 7 Prozent, was angesichts der sehr kleinen Übertragungsfläche von nur $0,04\text{m}^2$ eine industrielle Anwendung sinnvoll erscheinen lässt. In den Ergebnissen muss neben der ermittelten relativen Feuchte auch die Lufttemperatur vor und nach der Befeuchtung beachtet werden, da sich diese auf die Werte der relativen Luftfeuchte auswirken. Der in Bild 44 dargestellte Graph weist deshalb zusätzlich die Differenz der Temperatur vor und nach der Befeuchtung aus. Jedoch ist der Wert in Bezug auf die Temperatur vor der Befeuchtung negativ. Die Lufttemperatur hat sich demzufolge in dieser Messreihe bei durchschnittlich 20°C Wassertemperatur und 19°C Lufttemperatur zwischen $0,5$ und 1K abgekühlt. Dies bedeutet zum einen, dass, wenn auch sehr geringfügig, es in dieser Anwendung zu einer leichten Abkühlung der befeuchteten Luft kommt. Der Einfluss auf die Lufttemperatur ist jedoch sehr gering. Die größte Wärmemenge wird, wie in den Vorversuchen bereits vermutet, dem Wasserreservoir entzogen. In diesem musste zur Aufrechterhaltung der Startbedingun-

gen eine entsprechende Wärmeleistung zur Kompensation der Verdunstungsenthalpie aufgebracht werden. Dies ist für eine technische Verwertung von großer Bedeutung und wird anhand einer weiteren Messreihe mit erhöhter Wassertemperatur noch einmal aufgegriffen. Zum anderen reduziert sich die eigentliche Befeuchtungsleistung hinsichtlich der absoluten Wasseraufnahme um etwa 5 Prozent aufgrund der veränderten Temperatur. Dies bedeutet jedoch, dass die Steigerung der relativen Feuchte trotzdem bei etwa 6-6,5 Prozent liegt.

Die ermittelte Befeuchtungsleistung dieser Konstruktionslösung liegt bei 0,06 kg/h.

Ziel wäre wie beschrieben eine Steigerung der relativen Feuchte um etwa 10 Prozent auf etwa 30%rF.

Mit der gebauten Lösung ist man angesichts der sehr kleinen wirksamen Membranfläche von lediglich 0,04m² diesem Ziel bereits sehr nahe. Geht man von einem annähernd proportionalen Verhältnis der wirksamen Membranfläche zur Befeuchtungsleistung aus, könnte man bereits mit weniger als 0,1 m² Membranfläche im vorliegenden Versuchsaufbau das gewünschte Ziel erreichen.

Um die ermittelten Werte auf eine breitere Ergebnisbasis zu stellen und zudem auch beurteilen zu können, ob es Alterungserscheinungen, bzw. eine wie in den technischen Beschreibungen ausgeführte zu erwartende Leistungsreduktion durch Verschmutzung im Dauerbetrieb gibt, wurde eine weitere Versuchsreihe im Dauerbetrieb gestartet.

Als Randbedingung wurde erneut eine Lufttemperatur und Wassertemperatur von 20°C, eine relative Feuchte von 15-20 Prozent und eine Strömungsgeschwindigkeit von 1,75 m/s eingestellt. Dies entspricht dem beschriebenen Volumenstrom von etwa 50 m³/h.

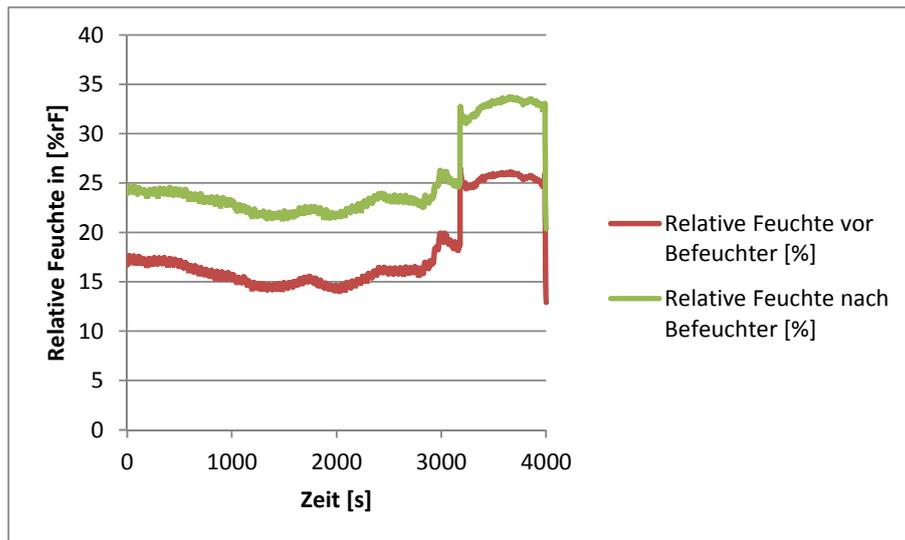


Bild 45:
Messverlauf über mehrere Tage.

Wie in Bild 45 erkennbar ist, war es mit der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik nicht möglich, gleiche und konstante Randbedingungen für die Messung bereit zu stellen. Zwar gab es immer wieder Phasen, in denen die Bedingungen annähernd gleich und konstant waren, jedoch nicht in einem für die Ergebnissicherung zufriedenstellenden Maß. Diese reduzierte Vergleichbarkeit erschwert gesicherte Aussagen über das Langzeitverhalten. Aus diesem Grund wurde entschieden, einen komplett neuen Messaufbau zu realisieren.

4.4 Ergebnisse der Untersuchung zur Langzeitwirkung mit Funktionsmuster 4

Ziel dieser Messreihe war vor allem die Untersuchung des Langzeitverhaltens hinsichtlich der Befeuchtungsleistung sowie der Einfluss der Wasserqualität auf mögliche Wartungs- und Ersatzzyklen der Membrane.

Zum Start wurde zur Bestätigung der Ergebnisse aus der ersten Messreihe zunächst noch einmal der Einfluss der Wassertemperatur auf die Leistungskennwerte der Lösungskomponente ermittelt (Bild 46).

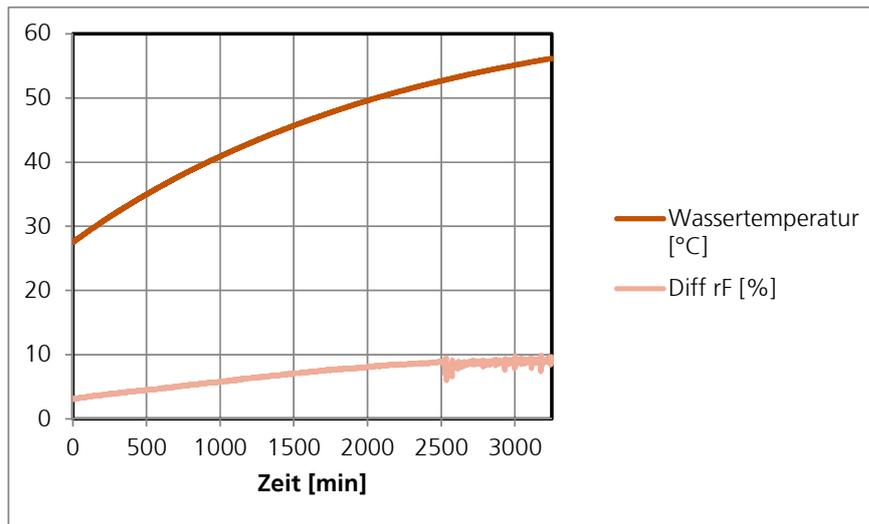


Bild 46:
Einfluss der Wassertemperatur auf die Befeuchtungsleistung.

Die Startbedingung sieht hierbei einen Luftvolumenstrom von 235 m³/h vor. Die Wassertemperatur wird kontinuierlich von anfangs 28°C auf 55°C erhöht. Als Befeuchter wird das Funktionsmuster 4 mit der VANADion[®] Membrane verwendet.

Bild 46 zeigt, dass über die Wassertemperatur die Befeuchtungsleistung gut zu beeinflussen ist und die Werte der Feuchtezunahme mit steigender Wassertemperatur von anfangs etwa 3 Prozent auf knapp 10 Prozent ansteigen was etwa eine Verdreifachung der Befeuchtungsleistung mit einer Steigerung der Wassertemperatur von knapp 30K entspricht.

Gleichzeitig zeigt sich wie vermutet, dass mit steigender Wassertemperatur auch die Lufttemperatur trotz der zu kompensierenden Verdunstungsenthalpie steigt. Im aktuellen Messaufbau des Funktionsmusters 4 liegt mit einer Wassertemperatur im Bereich der Raumluft von 20°C, die Temperaturdifferenz nach Befeuchtung lediglich nur noch um etwa 0,3K tiefer. Im Fall der Wassertemperatur von 37°C steigt die Lufttemperatur um etwa den gleichen Betrag von 0,3K an, d.h. dass nicht nur die notwendige Wärmeenergie aus dem Wasser gezogen wird, sondern die durch das Wasser angewärmte Membranoberfläche zudem zu einer leichten Erwärmung führt. Auf jeden Fall zeigt sich deutlich, dass fast die gesamte Wärmeenergie des Phasenübergangs dem Befeuchtungswasser entzogen wird. Dies ist für eine technische Verwertung von großer Relevanz, denn die Nachjustierung der Lufttemperatur nach der Befeuchtung ist sehr aufwendig und kostenintensiv.

Zudem kann man erkennen (Bild 47), dass sich mit dem neuen Testaufbau konstantere Randbedingungen der Luftfeuchte vor der Befeuchtungseinheit herstellen lassen.

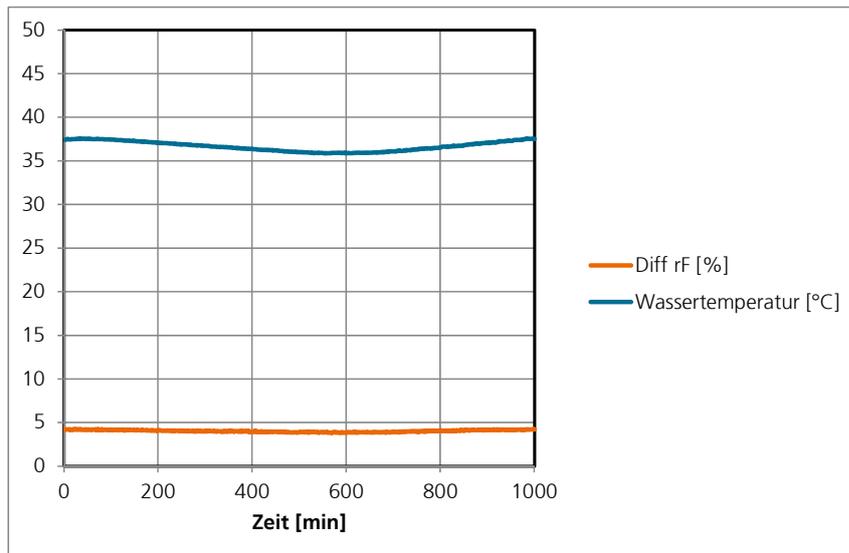


Bild 47:
Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung.

Man kann erkennen, dass unter den gesetzten Randbedingungen konstant eine Erhöhung der relativen Feuchte um etwa 5 Prozent erreicht werden kann. Die Lufttemperatur hat sich dabei wie zuvor beschrieben um etwa 1,5 K erhöht.

Auch hier erreicht man wie in der zuvor gewählten Versuchsanordnung etwa die Hälfte der notwendigen Erhöhung der Luftfeuchte von etwa 10 Prozent. Wie beschreiben liegt der Luftvolumenstrom bei etwa 235 m³/h und die wirksame Membranübertragungsfläche bei 0,08m².

Die Befeuchtungsleistung dieser Konstruktionslösung liegt demnach je nach Wassertemperatur zwischen 0,125 kg/h und 0,4 kg/h.

4.5 Untersuchungsergebnisse für die Tyvek®-Membran im Funktionsmuster 4

Mit den identischen Startbedingungen der zuvor durchgeführten Messung mit der VANADion®-Membran wurde nun eine Messung mit einer typischen dampfdiffusionsoffenen Baumembran durchgeführt.

Die Tyvek®-Membran war etwas komplizierter in der Einbringung in das Funktionsmuster, da es nicht wie die Ionomere eine entsprechende Quellwirkung bei Wasserkontakt aufweist. Diese zur Abdichtung der Trennfläche zwischen Wasser und Luft sehr hilfreiche Eigenschaft weist die Tyvek®-Membran nicht auf, so dass zusätzliche Dichtmaßnahmen erforderlich waren.

Die weiteren Randbedingungen betragen identisch wie zuvor einen Luftvolumenstrom von 235m³/h sowie eine Wassertemperatur von etwa 37°C.

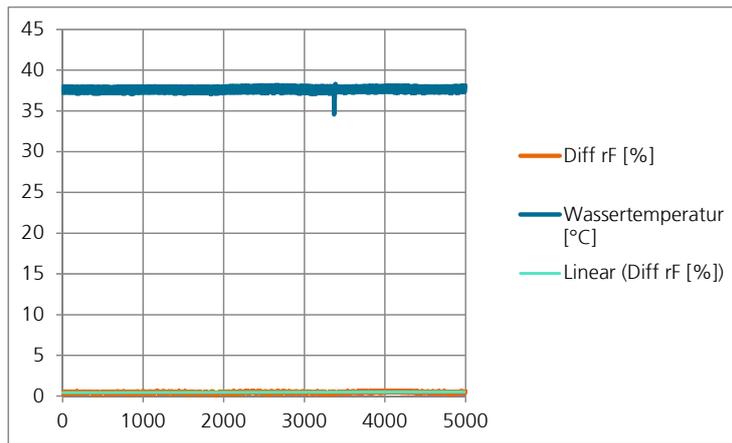


Bild 48:
Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung der Tyvek®-Membran.

Man kann sehr gut erkennen, dass die Befeuchtungsleistung hier bei weitem nicht das Niveau von VANADion® erreicht. Die Messwerte der Steigerung der Luftfeuchte liegen verschwindend klein im Bereich von etwa 0,5 Prozent.

Aufgrund der geringen Wirkung dieser Lösung wurde noch eine weitere Materialvariante auf der Grundlage eines Polyamids untersucht. Die besondere Eigenschaft der Polyamide liegt in der Tatsache, dass sie keinen festen Wert des Feuchtedurchgangs aufweisen, sondern mit zunehmender Feuchte durchgängiger werden. So liegen die s_D -Werte bei trockenen Bedingungen recht niedrig, steigen jedoch mit wachsender Feuchte an.

Zu diesem Zweck wurde diese Lösung anhand des Funktionsmusters 6 ohne zusätzliche Luftströmung untersucht. Die Ergebnisse sind daher im Kapitel 4.7 beschrieben.

4.6 Messergebnisse der dezentralen Anwendung mit dem Funktionsmuster 5

Zur Überprüfung einer marktgerechten Anwendung mit möglichst geringem technischem Aufwand wurde ein weiteres Funktionsmuster entwickelt und gefertigt, welches wie beschrieben eine passive dezentrale Anwendung in Kombination mit einem Heizkörper ermöglicht.

Vorteil dieser Lösung ist der vollkommene Verzicht auf einen technischen Antrieb in Form eines mechanisch erzeugten Luftstroms. Dieser resultiert allein aus dem durch die Beheizung des Heizkörpers erzeugten Konvektionsstroms. Je nach eingestellter Vorlauftemperatur ergibt sich ein unterschiedlich starker Konvektionsstrom durch den Heizkörper.

Im Prinzip fungiert der Heizkörper in unserem Fall wie eine raumseitige Umluft-Komponente, welche zudem durch die Erwärmung der Luft für eine erhöhte Feuchtaufnahme durch die Befeuchtungseinheit sorgt.

Die aufgrund der Konvektion des Heizkörpers erzeugte Luftvolumenströmung hängt von den Vorlauftemperaturen des Heizkörpers ab. Um die Befeuchtungsleistung des Funktionsmusters 5 zu bestimmen, bedarf es der Messung der Volumenstromwerte. Aufgrund der Tatsache, dass diese Strömung nicht wie in einem Lüftungsrohr eine gewisse Strömungsgeometrie ausprägt und damit nicht anhand eines einzelnen Messpunkts valide ermittelt werden kann, wurde hierzu die in Kapitel 3.3 beschriebene PIV-Methode verwendet. Bild 49 zeigt die ermittelten Strömungsvektoren anhand der Messrandbedingungen aus Tabelle 5.

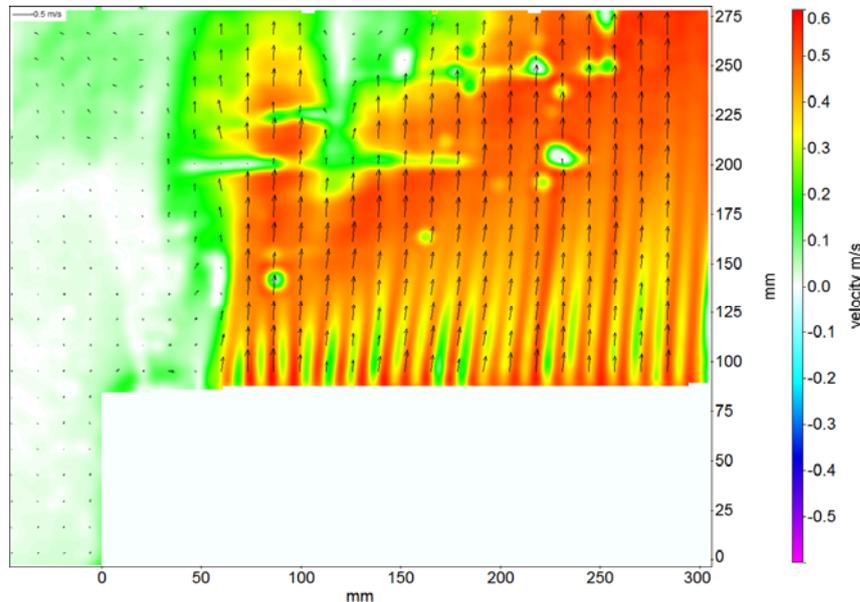


Bild 49:
Konvektionsermittlung anhand von PIV mit Abbildung des Strömungsfeldes.

Tabelle 5:
Randbedingungen der PIV-Messung des Konvektionsstroms.

Parameter	Beschreibung	Wert
ϑ_{VL}	Vorlauftemperatur am HK-Eintritt	55,3 °C
ϑ_{RL}	Rücklauftemperatur am HK-Austritt	45,3 °C
\dot{m}_{HK}	Heizkörper-Massenstrom	0,60 l/min
ϑ_L	Raumlufttemperatur Messzelle	19,6 °C
φ_L	Raumluftfeuchte Messzelle	68,2 %
ϑ_{AF}	Oberflächentemperatur-Fenster	17,7 °C
$\vartheta_{L_{HK,ein}}$	Luft Eintrittstemperatur Heizkörper	20,4 °C
$\varphi_{L_{HK,ein}}$	Luft Eintrittsfeuchte Heizkörper	62,6 %
$\vartheta_{L_{HK,aus}}$	Luft Austrittstemperatur Heizkörper	26,3 °C
$\varphi_{L_{HK,aus}}$	Luft Austrittsfeuchte Heizkörper	40,8 %

Insgesamt wurden für folgende Vor- und Rücklauftemperaturen die jeweiligen Strömungsgeschwindigkeiten und daraus abgeleitet der jeweilige Luftvolumenstrom durch die Systemkombination aus Heizkörper und Befeuchtungsaufsatz ermittelt:

- 45°C/40°C
- 55°C/45°C
- 70°C/55°C

Um die Raumtemperatur trotz des aktiven Heizkörpers konstant auf 20°C zu halten, wurde ein realitätsnahes Szenario anhand einer auf eine Seitenwand des IATC simulierten Außenwandsituation mit einem zusätzlichen Fensterelement oberhalb des Heizkörpers umgesetzt. Diese Wandoberfläche weist demnach eine im Verhältnis zur Raumlufttemperatur reduzierten Wert von etwa 18°C auf (Bild 36).

Tabelle 6 zeigt die anhand der PIV-Methode ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten anhand variierender Vorlauftemperaturen und Aufbauten. Diese bilden die Grundlage zur Ermittlung der Luftvolumenströme durch die Befeuchtungseinheit.

Tabelle 6
Ermittelte Strömungsgeschwindigkeiten im Versuchsaufbau.

Messung (VL/RL/L-U _w)	Schlitz mittig			Schlitz Randzone		
	v _{min} [m/s]	v _{max} [m/s]	v _{mw} [m/s]	v _{min} [m/s]	v _{max} [m/s]	v _{mw} [m/s]
45/40/20-3,5	0,23	0,41	0,34	0,23	0,41	0,36
45/40/20-1,6	0,23	0,40	0,34	0,27	0,40	0,33
45/40/20-0,8	0,24	0,39	0,34	0,28	0,42	0,36
45/40/20-0,8 mit Modul	0,30	0,46	0,40	0,24	0,48	0,40
45/40/20-0,8 ohne Gitter	0,19	0,31	0,25	0,24	0,32	0,30
45/40/18-0,8	0,24	0,42	0,35	0,24	0,43	0,37
55/45/20-3,5	0,31	0,48	0,40	0,37	0,49	0,44
55/45/20-1,6	0,31	0,47	0,39	0,33	0,43	0,38
55/45/20-0,8	0,28	0,46	0,38	0,27	0,45	0,38
55/45/20-0,8 mit Modul	0,32	0,52	0,44	0,37	0,57	0,48
55/45/20-0,8 ohne Gitter	0,23	0,35	0,28	0,33	0,37	0,34
55/45/18-0,8	0,31	0,49	0,40	0,33	0,43	0,39
70/55/20-3,5	0,35	0,54	0,45	0,39	0,57	0,48
70/55/20-1,6	0,35	0,51	0,43	0,39	0,56	0,48
70/55/20-0,8	0,32	0,53	0,44	0,38	0,56	0,47
70/55/20-0,8 mit Modul	0,27	0,66	0,52	0,32	0,66	0,52
70/55/20-0,8 ohne Gitter	0,33	0,45	0,38	0,38	0,44	0,40
70/55/18-0,8	0,31	0,51	0,45	0,28	0,55	0,45

Zur Abbildung und Einschätzung des Wirkungspotentials des Funktionsmusters 5 wurden die Auswirkungen auf die Luftfeuchte in Bezug auf den Gesamtraum des IATC (Bild 35) ermittelt. Zunächst wurde der Raum unter Luftabschluss betrieben, so dass die Werte des Anstiegs der relativen Feuchte ermittelt wurden.

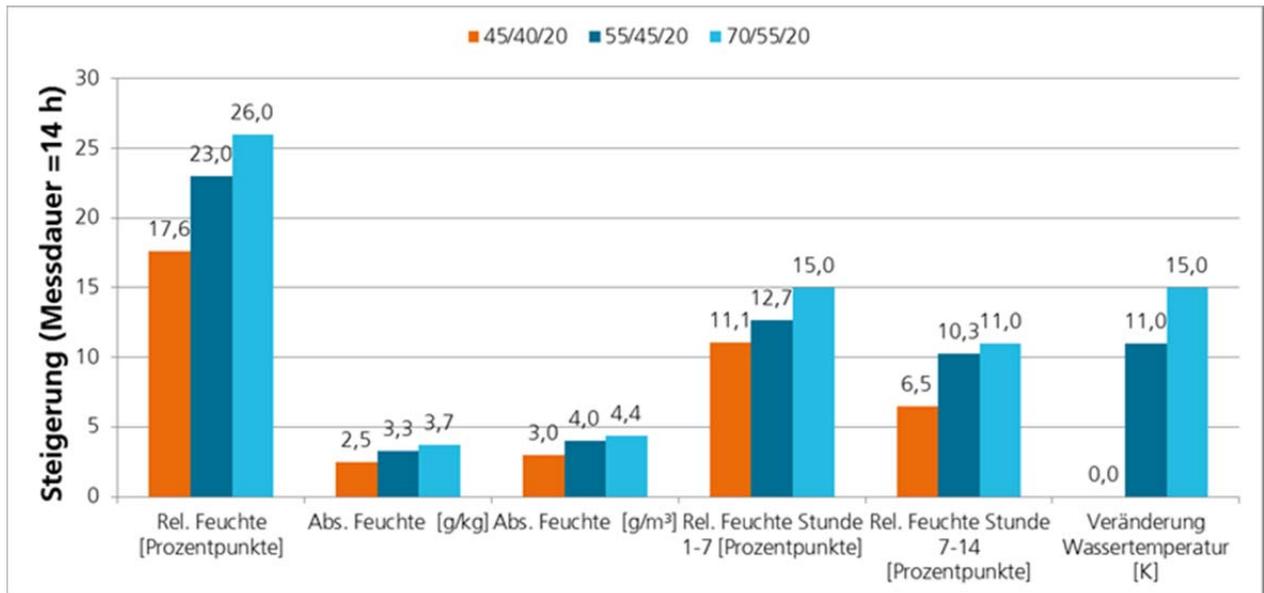


Bild 50:
Messergebnisse der Befeuchtungsleistung für Funktionsmuster 5.

Die Ergebnisse weisen eine sehr vielversprechende Befeuchtungsleistung aus. Aufgrund des fehlenden Luftwechsels im Raum steigen die Feuchtwerte sehr schnell an, was die gute Funktion und Wirkungsweise belegt. Wie zu erwarten steigt zudem die Befeuchtungsleistung mit dem Anstieg der Heizkörper-Vorlauftemperatur, da hierdurch sowohl der Konvektionsstrom, wie auch die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft ansteigt.

Deutlich spannender war natürlich die Frage, ob diese doch recht kleine und passive Befeuchtungseinheit in der Lage ist, einen im Verhältnis relativ großen Raum wie dem IATC (130,5 m³ Raumvolumen) mit einem üblichen Luftwechsel von 0,5/h um die entscheidenden 10 Prozent mehr an relativer Feuchte zu versorgen.

Die Ergebnisse in Bild 51 zeigen eindrucksvoll dieses Potential auf.

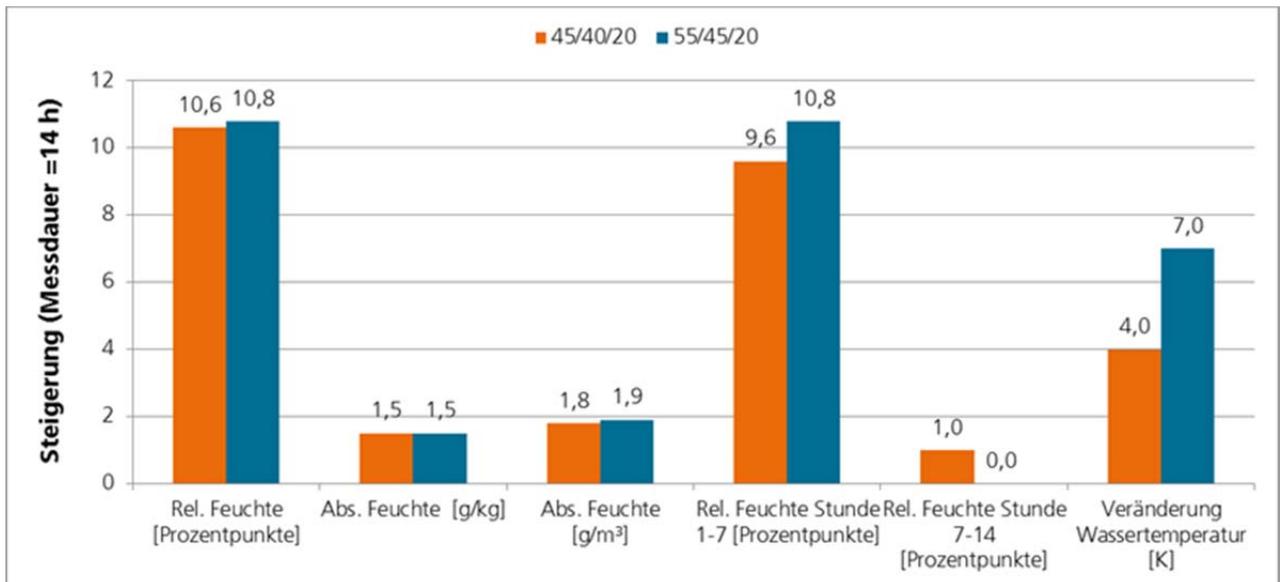


Bild 51:
Messergebnisse des Funktionsmusters 5 mit einem Raumlufwechsel von 0,5/h.

Bild 51 zeigt, dass die Komponente in der Lage ist, die relative Raumlufteuchte dauerhaft um etwa 10 Prozent zu steigern. Dies ist weitgehend unabhängig von der Vorlauftemperatur des Heizkörpers. Aufgrund der Tatsache, dass diese Anwendung sowohl durch geringe Kosten, einer einsehbaren Membranoberfläche zur Kontrolle der Hygiene und der einfachen Möglichkeit zur manuellen Befüllung durch den Benutzer gekennzeichnet ist, birgt diese Lösung ein sehr hohes Umsetzungspotential.

4.7 Messergebnisse der Luft-zu-Luft Befeuchtung

Da zu erwarten war, dass die Luft-zu-Luft Übertragung hinsichtlich der erzielbaren Befeuchtungsleistung deutlich geringer ausfällt, wurden zunächst sehr geringe Luftvolumenströme gewählt, um einen Effekt der Befeuchtung feststellen zu können.

Als Startbedingung wurden daher 25m³/h auf der trocknen Luftseite sowie 40m³/h auf der feuchten Luftseite gewählt.

In Bild 52 kann man gut erkennen, dass die relative Feuchte auf der zu befeuchtenden Luftseite sogar etwas absinkt, was jedoch vor allem der Tatsache geschuldet ist, dass sich die Luft beim Durchströmen leicht erwärmt, so dass um den Temperatureffekt bereinigt die absolute Feuchte im Luftstrom praktisch gleichbleibt. Es konnte demnach mit dieser Systemlösung mit den verfügbaren Wirkflächen keine signifikante Wirkung festgestellt werden.

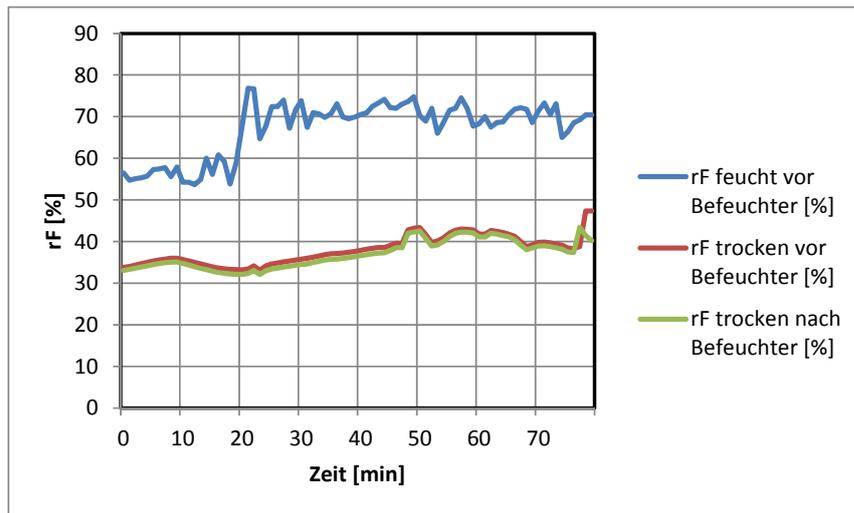


Bild 52:
Messergebnisse der Luft-zu-Luft Messung.

Zur Validierung des Messaufbaues wurde zusätzlich eine Messung ohne Luftströmung durchgeführt. Ziel ist es, festzustellen, ob und in welcher Geschwindigkeit grundsätzlich eine Feuchteübertragung von feuchter zu trockener Luft möglich ist.

Hierzu wurden die beiden Rohrstücke am Funktionsmuster geschlossen und auf einer Seite (oben) eine Feuchtequelle eingebracht, welche die relative Luftfeuchte sukzessive auf annähernd 100 Prozent steigert. Festzustellen galt es, wie schnell sich die trockene Seite (unten) hierdurch ebenfalls anfeuchten lässt.

Bild 53 zeigt deutlich, dass sich mit der Startbedingung von etwa 20%rF auf der feuchten Seite (oben), aufgrund der eingebrachten Feuchtequelle (Schale mit Wasser) die trockene Seite mit einer Startbedingung von etwa 10%rF extrem schnell an den Feuchteanstieg der oberen Seite anpasst. Bereits nach wenigen Minuten kann kaum mehr ein Unterschied zwischen den beiden Luftmengen festgestellt werden, was auf ein extrem schnelle Übertragung hindeutet.

Das Ergebnis lässt sich jedoch in seiner Qualität besser einordnen, wenn man die Ergebnisse des in Kapitel 4.5 erwähnten weiteren Materiallösungen eines Polyamids hinzuzieht.

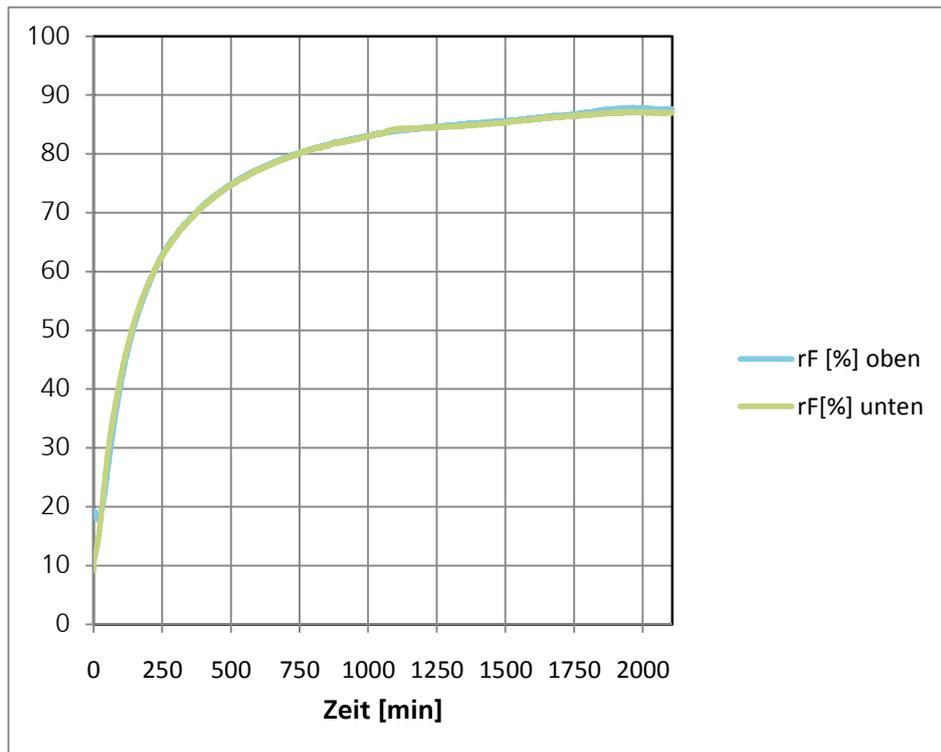


Bild 53:
Messergebnisse der Luft-zu-Luft Messung ohne zusätzliche Luftströmung.

Bild 54 zeigt die Ergebnisse einer feuchteadaptiven Membranlösung auf Polyamid-Basis, die unter feuchten Bedingungen ähnliche s_D -Werte aufweist, wie die VANADion® Membran.

Man kann gut erkennen, dass in diesem Fall die Anpassung der Feuchte auf der trockenen Seite deutlich langsamer erfolgt als zuvor mit VANADion®.

Selbst bei sehr hohen relativen Feuchten gelingt es nicht wie im Versuch zuvor eine derart schnelle Übertragung zu ermöglichen, so dass die Kurven annähernd deckungsgleich verlaufen.

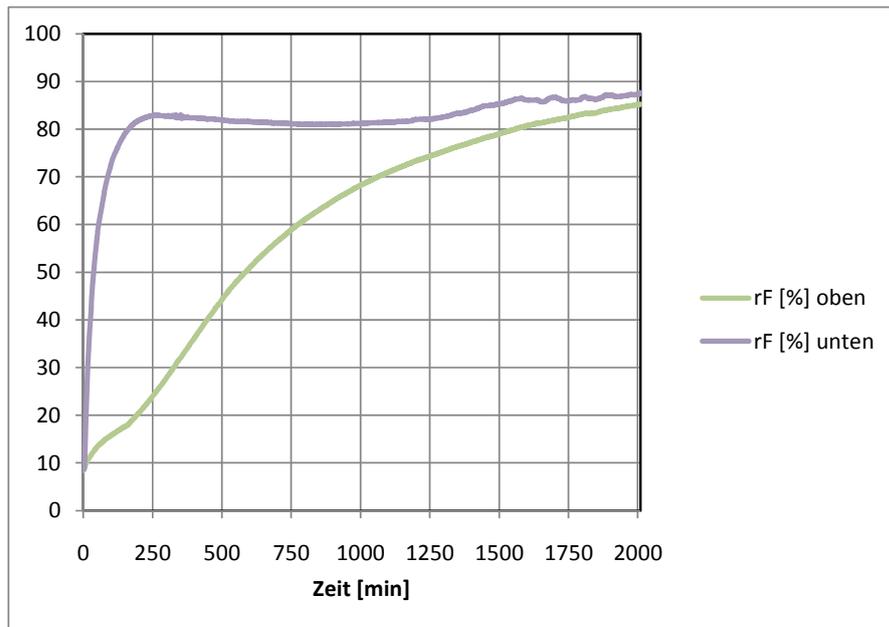


Bild 54:
Messergebnisse der Luft-zu-Luft Messung mit feuchteadaptiver Polyamid-Membran ohne zusätzliche Luftströmung.

Abschließend ist festzustellen, dass grundsätzlich ein Feuchtaustausch zwischen unterschiedlichen feuchten Luftströmen über die Membranen möglich ist, jedoch im Falle der Verwendung als „Feuchte-Tauscher“ zwischen Zu- und Abluft mit dem genutzten Funktionsmuster keine ausreichende Wirkung nachweisen konnte.

Die Übertragungsfläche war demnach zu klein, so dass eine deutliche Erhöhung evtl. zu praxisgerechten Lösungen führen kann. Hierfür wären jedoch sehr große VANADion®-Membranflächen erforderlich, welche aufgrund der aktuellen Kosten kaum eine wirtschaftlich Nutzung erwarten lassen. Aus diesem Grund wurde auf den geplanten Bau und die Vermessung eines weiteren Funktionsmusters der Vaillant GmbH verzichtet.

4.8 Notwendige Wartungs- und Reinigungszyklen

4.8.1 Langzeiteffekte auf die Befeuchtungsleistung mit Variation der Wasserqualität

Ziel dieser Messreihe war die Beurteilung, ob und wie stark sich die Befeuchtungsleistung über die Anwendungsdauer durch Verschmutzungsprozesse der Membran verändert. Hierzu wurden erneut die Startbedingungen der Untersuchung aus Kapitel 4.6 verwendet. Der Luftvolumenstrom betrug demzufolge $235\text{m}^3/\text{h}$. Es kam das Funktionsmuster 4 mit der VANADion®-Membran zum Einsatz und die Wassertemperatur betrug durchschnittlich etwa 37°C .

Die Variation bestand in der Qualität des verwendeten Befeuchtungswassers. Bislang wurde für alle Versuche sehr reines Wasser aus einer Osmose-Anlage verwendet. Zunächst wurde erneut diese hohe Qualität des Wassers verwendet, um zu sehen, in wie weit sich die Befeuchtungsleistung reduziert. Zur Differenzierung wurde im Anschluss übliches Leitungswasser verwendet, welches am Standort eine sehr hohe Wasserhärte von etwa 13° aufweist. Es ist demnach sehr kalkhaltig und es war zu erwarten, dass es mit den Diffusionsprozessen zu entsprechenden Ablagerungen auf der Wasserseite der Membranfläche kommt, welche sich leistungsmindernd auswirken.

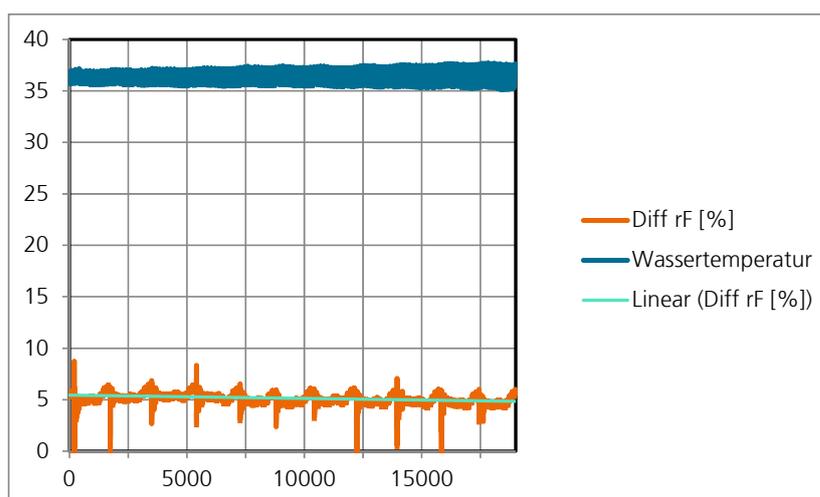


Bild 55:
Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung mit Trendlinie für Osmosewasser.

Betrachtet man die Trendkurve des Verlaufes für die hohe Wasserqualität kann man erkennen, dass sie über den dargestellten Zeitraum von etwa 14 Tagen nur sehr geringfügig in der Leistung abnimmt. Es ist demnach davon auszugehen, dass bei geeigneter hoher Wasserqualität ein sehr langer Einsatz mit annähernd gleichbleibender Befeuchtungsleistung möglich ist.

Deutlich anders stellt sich die Situation unter der Verwendung von üblichem Leitungswasser dar. Hier nimmt die Befeuchtungsleistung über einen vergleichbaren Zeitraum fast auf Null ab.

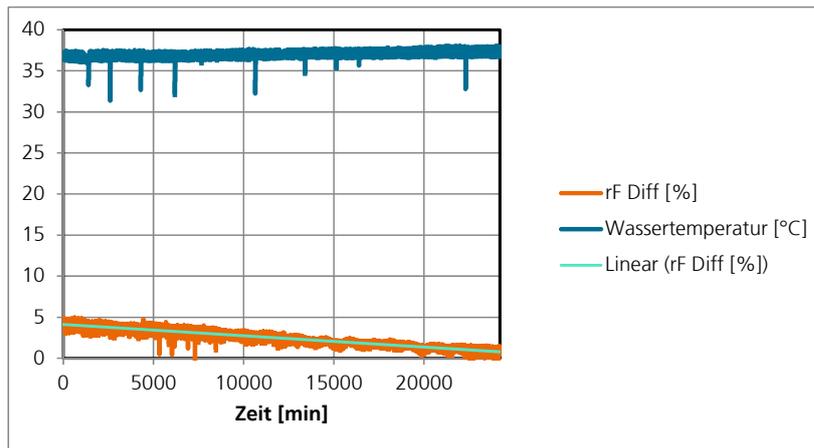


Bild 56:
Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung mit Trendlinie für Normalwasser.

Die Kalkablagerungen auf der Wasserseite der Membran sind sehr gut zu erkennen (Bild 57). Zwar kann die VANADion®-Membran aufgrund ihrer hohen Säurebeständigkeit wieder vollständig regeneriert werden. Dies erfordert jedoch entweder einen entsprechenden Spülvorgang mit einem hochkonzentrierten Entkalker oder den Ausbau der Membran.



Bild 57:
Kalkablagerungen auf der Innenseite der Membran mit Normalwasser.

Somit bleibt festzuhalten, dass sich mit der Einschränkung der Verwendung einer hohen Wasserqualität eine sehr lange Standzeit der Membran erreichen lässt.

4.9 Untersuchungen zur Lufthygiene

4.9.1 Aufgabenstellung

Ziel war die Untersuchung der VANADion® Membran zur energiesparenden und hygienischen Raumlufthefeuchtung auf ihre Durchlässigkeit für Mikroorganismen (Bakterien). Hierbei wurden zwei Untersuchungsschwerpunkte betrachtet:

- Durchlässigkeit einer frischen Membran eingebaut in einem Modul zur Raumlufthefeuchtung
- Untersuchung zweier gebrauchter Membranen auf Bakterienwachstum

4.9.2 Prüfaufbau

Im ersten Versuchsaufbau wurde eine frische Membrane, welche sich zuvor noch in keinem Versuchsablauf befand, in das Funktionsmuster 3 eingebaut.

Bild 58 zeigt den Luftbefeuchter, angeschlossen an ein Wasserreservoir.

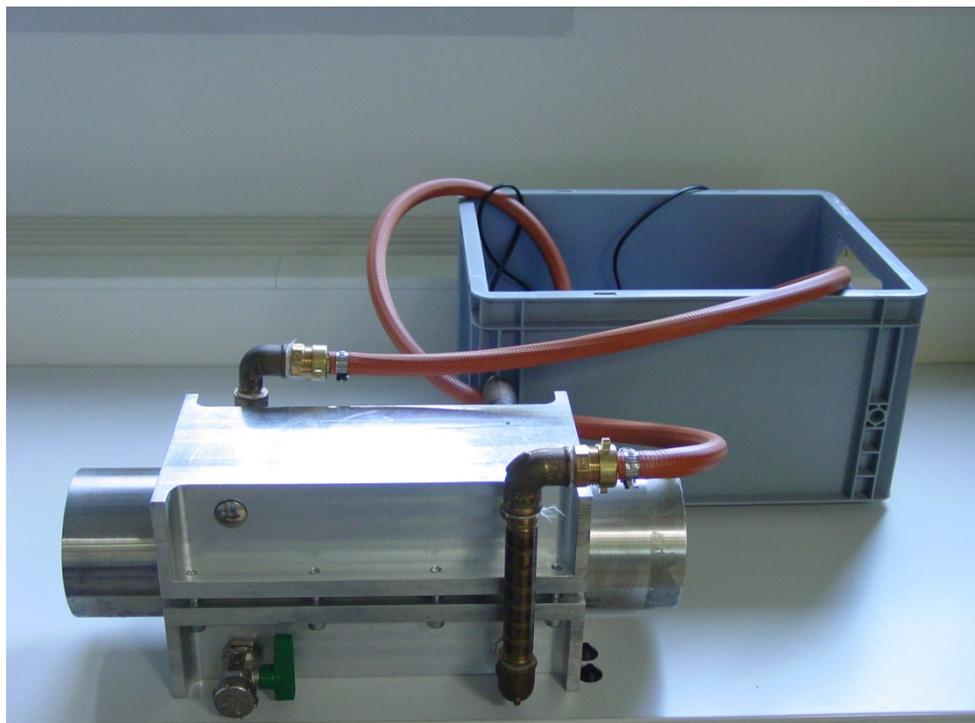


Bild 58:
Luftbefeuchter mit Wasserreservoir.

Die zweite Untersuchung bezog sich auf eine Membrane die bereits über ca. 6 Monate in den vorangegangenen Versuchen verwendet wurde.

Zur Untersuchung wurden zwei Stücke der VANADion®-Membrane bereitgestellt, die aus dem Funktionsmuster 3 und 4 ausgebaut wurden. Eine der Membranen (Membran 1) weist dabei auf der von Luft angeströmten Seite verschiedene deutlich sichtbare Verfärbungen auf (Bild 59 und Bild 60). Die weniger verfärbte Membran (Membran 2) war für eine kürzere Zeit im Befeuchter eingebaut. Beide Membranen zeigen auf der von Wasser angeströmten Seite anorganische Ablagerungen auf.

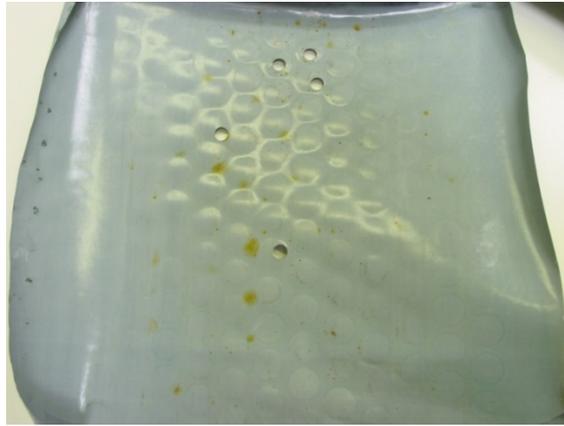


Bild 59:
Membran 1 mit deutlichen Verfärbungen auf der der Luft angeströmten Seite.



Bild 60:
Membran 2 mit weniger Verfärbungen.

4.9.3 Prüfmethodik und -durchführung

Es wurden zwei vergleichende Luftkeimmessungen durchgeführt mit unterschiedlich starker Bakterienbelastung des Reservoirwasser des Luftbefeuchters.

Durchgang 1 war mit $14,6 \times 10^6$ Bakterien versetzt.

Durchgang 2 war mit der ca. tausendfachen Bakterienzahl von $11,4 \times 10^9$ versetzt.

Parallel dazu wurde zu Vergleichszwecken eine Luftkeimmessung der normalen Raumluft ohne Luftbefeuchtung durchgeführt.

Die Bakterienlast des Reservoirwassers wurde jeweils durch Anzucht und Auszählung der Bakterien nach Ansetzen einer Verdünnungsreihe bestimmt (Bild 61).



Bild 61:
Ansatz einer Verdünnungsreihe.

Die Luftproben wurden mit einem Filtrationssammler (Sartorius AirPort MD8) entnommen. Pro Luftfilter wurden 50 l Luft beprobt. An jeder Messstelle wurden 3 Luftproben gesammelt und die Luftfilter unmittelbar nach der Probenahme steril und luftdicht verpackt. Für die Luftkeimmessung der durch den Luftbefeuchter gesaugten Luft wurde das Messgerät direkt in der Öffnung des Luftbefeuchters platziert (Bild 62).

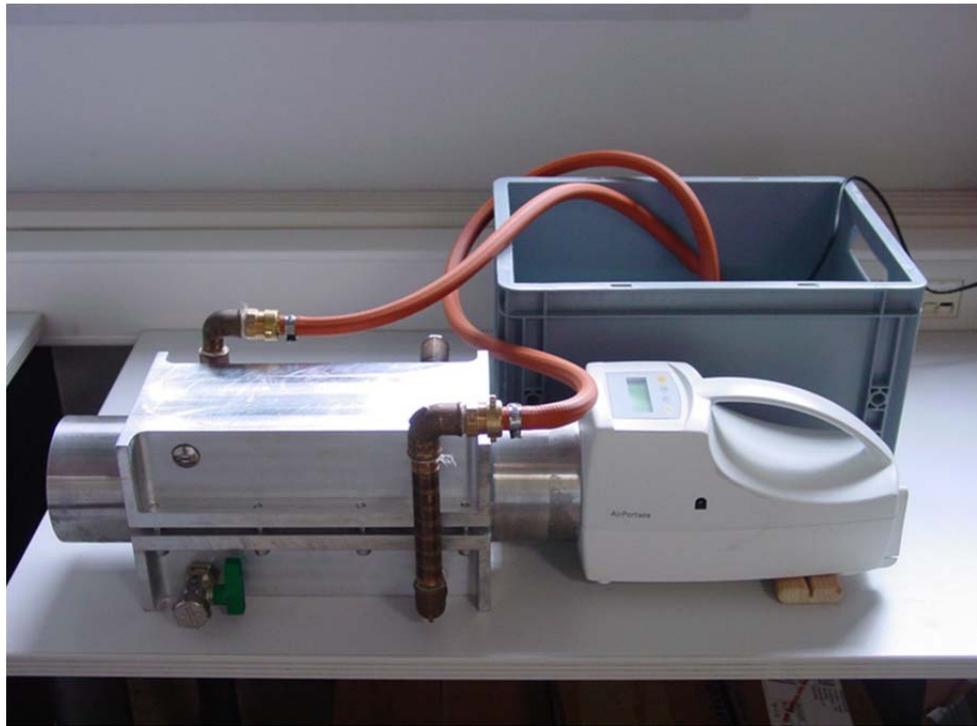


Bild 62:
Versuchsaufbau für die Luftkeimmessung der durch das Gerät angesaugten Luft.

Für die Ermittlung der Keimzahlen wurde ein allgemeines Medium (Plate-Count-Agar) verwendet. Die Luftfilter wurden unter sterilen Bedingungen in jeweils drei Parallelen auf die Nährböden aufgelegt und inkubiert. Die Auszählung der auf den Platten gewachsenen Kolonien erfolgte nach fünf und zehn Tagen. Die Angabe der Keimzahlen erfolgt in koloniebildenden Einheiten pro 50 Liter Luft.

Für die bereits im Einsatz befindlichen Membranen wurde eine Mikroskopische Untersuchung der Oberflächen durchgeführt.

Aus den Membranen wurden aus der Oberfläche an verschiedenen Stellen Proben mit einem Durchmesser von 8 mm ausgestanzt. Hierbei wurde vermieden, Anhaftungen von der Oberfläche durch Wisch- oder Reibungsvorgänge zu entfernen. Die Proben wurden mit der Seite, die im Luftbefeuchter vom Wasser angeströmt wird, mittels eines leitfähigen, beidseitig klebenden Kohlenstoffpads auf einen Aluminium-Probenträger aufgeklebt. Die oberliegende Seite (die von Luft angeströmte Seite im Luftbefeuchter) wurde im Rasterelektronenmikroskop zwei Proben der verfärbten Membran und eine Probe der weniger verfärbten Membran bei 40 - 20000facher Vergrößerung auf sichtbare Spuren von biologischem Aufwuchs untersucht.

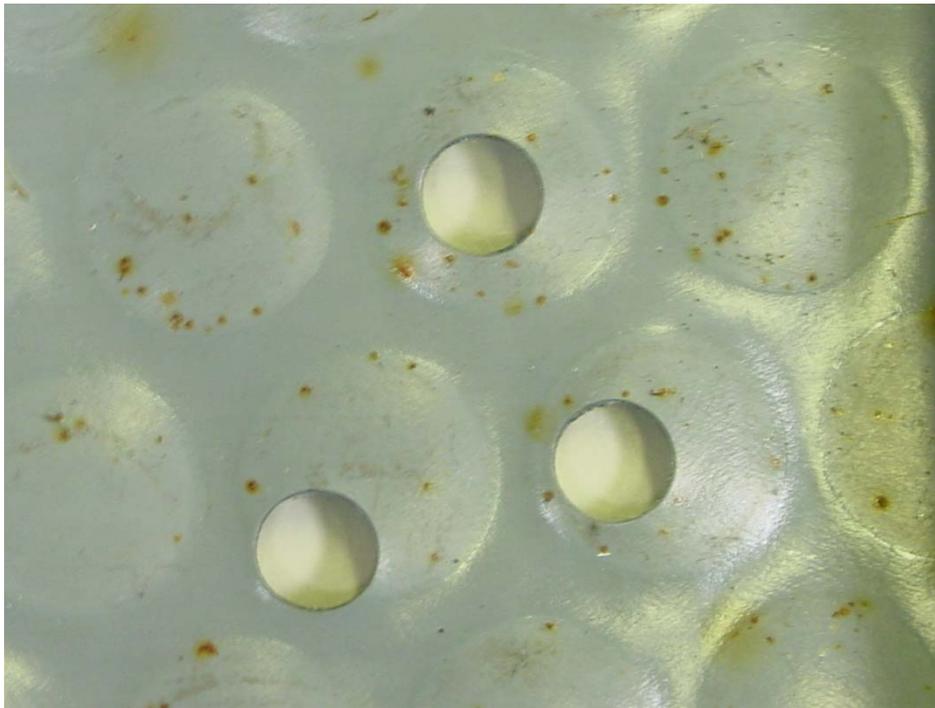


Bild 63:
Detailansicht der stärker verfärbten Membran mit den für die Mikroskopie ausgestanzten Löchern.

4.9.4 Ergebnisse der Untersuchungen

Luftkeimsammlung

Auf den Schalen der Luftkeimsammlung wurden verschiedene ausgekeimte Mikroorganismen festgestellt. Die Ergebnisse für die beiden Durchgänge sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7:
Bakterienbelastung der Luftkeimmessungen.

	Durchgang 1	Durchgang 2
Bakterien pro 50 Liter Luft	Wasser mit 16,6 x 10 ⁶ Bakterien pro Liter	Wasser mit 11,4 x 10 ⁹ Bakterien pro Liter
Luft Hintergrundkonzentration	3 Bakterien / 4,67 Pilze	1,67 Bakterien / 6,3 Pilze
Luft durch Filter angesaugt	6 Bakterien / 2,3 Pilze	4,3 Bakterien / 5,3 Pilze
Luft durch Filger angesaugt nach 1 Tag Filterbetrieb	Nicht gemessen	0,67 Bakterien / 5 Pilze

Mikroskopie

An den untersuchten Stellen der verfärbten Membran (luftangeströmte Seite) finden sich diverse Ablagerungen. Zwischen diesen Ablagerungen sind vereinzelt gut erhaltene, stäbchenförmige Bakterien sichtbar (Bild 64). Verbreitet sind im REM Verdunkelungen und reliefartige Strukturen (Bild 65, Bild 66, Bild 67) auf der Membran erkennbar, die in Größe und Form den stäbchenförmigen Bakterien entsprechen. Aufgrund dieser großen Ähnlichkeit ist es naheliegend, dass dies Reste eines Bakterienbewuchses bzw. eingetrocknete Bakterien in einem ebenfalls eingetrockneten Schleimfilm darstellt.



Bild 64:
Ablagerungen mit stäbchenförmigen Bakterien (Membran 1).



Bild 65:
Verdunkelungen und reliefartige Strukturen in Form von stäbchenförmigen Bakterien (Membran 1).

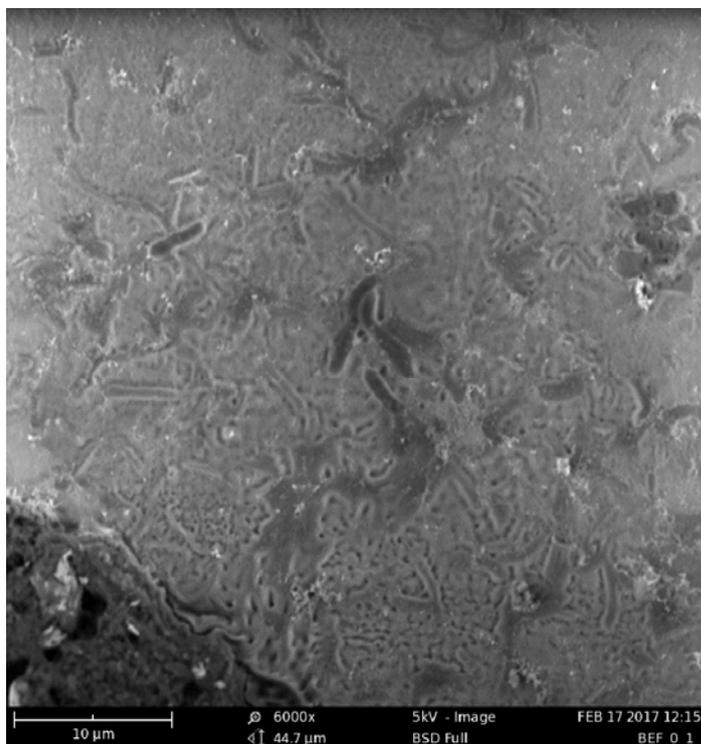


Bild 66:
Verdunkelungen und reliefartige Strukturen in Form von stäbchenförmigen Bakterien.

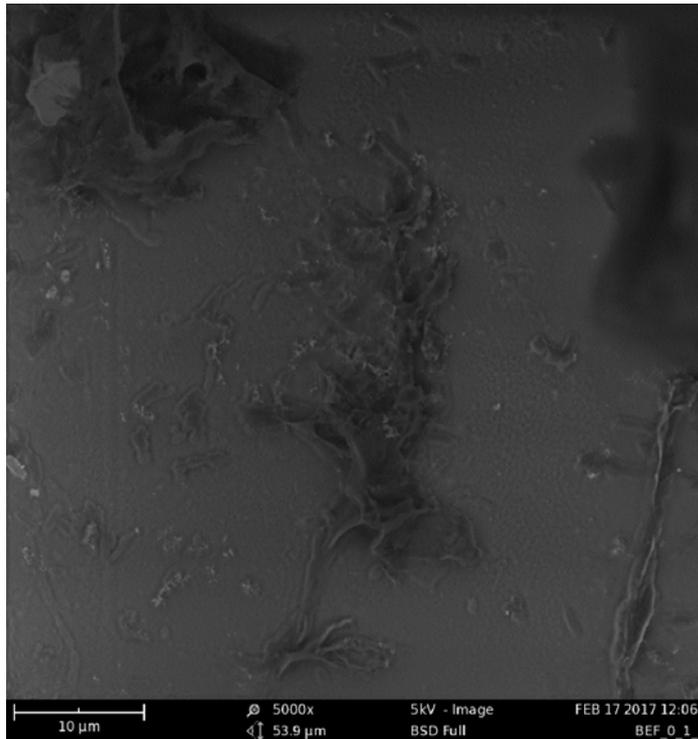


Bild 67:
Verdunkelungen und reliefartige Strukturen in Form von stäbchenförmigen Bakterien.

Neben den beschriebenen Bakterien traten vereinzelt fädige Strukturen auf, die Merkmale von Pilzhyphen aufweisen (Bild 68:). In einer der drei untersuchten Proben konnten die fädigen Strukturen zum Zentrum eines Myzels (Bild 69) verfolgt werden. In diesem Zentrum befanden sich auch Reste mehrerer Sporenträger (Bild 70), wodurch der aufgewachsene Pilz der Gattung *Cladosporium* zugeordnet werden kann.



Bild 68:
Fädige Strukturen auf, die Merkmale von Pilzhyphen aufweisen.

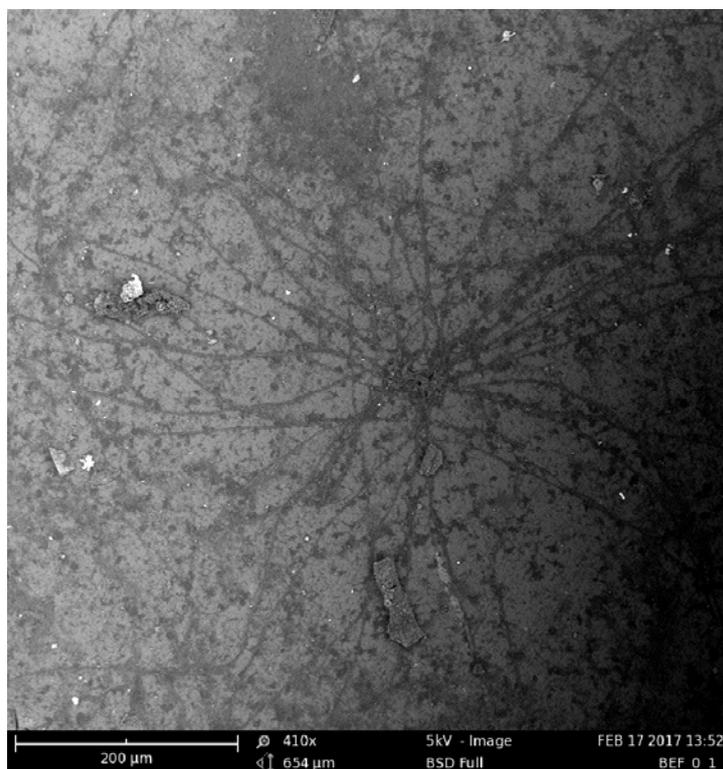


Bild 69:
Fädigen Strukturen, die zum Zentrum eines Myzels zusammenlaufen.

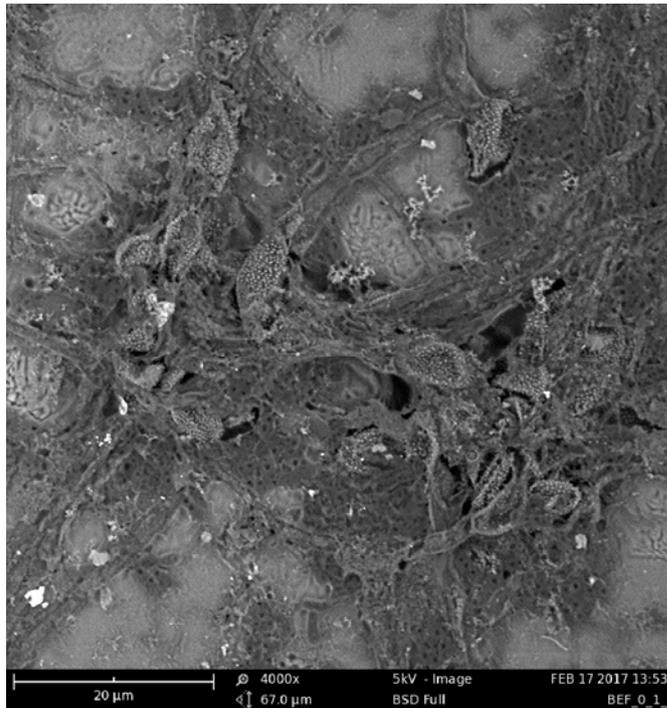


Bild 70:
Myzelzentrum mit Resten mehrerer Sporenträger.

Auf der weniger verfärbten Membran (Membran 2) haften verschiedene kleinere Partikel auf der Oberfläche (Bild 71). In der untersuchten Probe wurden keine Bakterien oder Pilze gefunden.

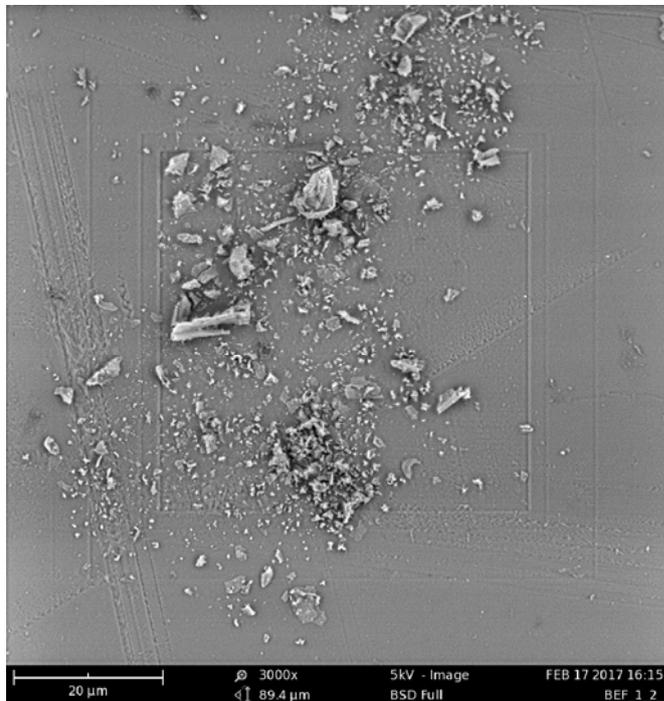


Bild 71:
Verschiedene kleine Partikel.

4.9.5 Fazit

Die Keimzahlen der Luftkeimmessungen sind durchwegs in einem sehr niedrigen Bereich. Auch bei der Messung, in der der Luftbefeuchter mit der VANADion®-Membran mit tausendfach erhöhter Bakterienbelastung gefahren wurde, ist kein Anstieg der Luftkeimbelastung zu verzeichnen. Sie bewegt sich weiterhin im Bereich der Hintergrundbelastung des Messraumes. Nach einer Laufzeit des Luftbefeuchters von 24 Stunden ist ebenfalls keine Erhöhung der Luftkeimbelastung feststellbar.

Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der sehr lange im Einsatz befindlichen Membran zeigt deutliche Spuren einer mikrobiologischen Besiedlung der Oberfläche vorwiegend mit stäbchenförmigen Bakterien, aber auch mit Pilzen.

Die kürzer im Einsatz befindliche Membran wies keinerlei Verkeimung oder Pilzwachstum auf, was aufzeigt, dass ein sehr hygienischer Betrieb sichergestellt werden kann, jedoch die Oberfläche bei längeren Einsatzzeiten überprüft und bei Anzeichen einer Verfärbung gereinigt oder ausgetauscht werden sollte.

Bei einer längeren Laufzeit kann sich auf der luftangeströmten Seite der VANADion®-Membran durch die in der Luft befindlichen Verunreinigungen und der hohen Feuchte im nahen Übergangsbereich der Membrane ein Biofilm bilden. Zur Sicherung einer längeren Standzeit ohne die Gefahr einer Verkeimung wäre über eine Vergütung der Oberfläche nachzudenken.

4.10 Berechnungs- und Simulationsmodell

Ein erstes Simulationsmodell wurde im Berechnungsprogramm WUFI® angelegt. WUFI® (Wärme Und Feuchte Instationär) ist eine Software-Familie zur realitätsnahen instationären Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen. Es basiert auf den neuesten Erkenntnissen in Bezug auf Dampfdiffusion und Flüssigtransport.

In Bezug auf die feuchterelevanten Prozesse arbeitet das Programm auf der Grundlage der klassischen FeuchteKennwerte aus Kapitel 3.1.

In Bezug auf die orientierenden Vorversuche wurde hierzu bereits ein entsprechendes Simulationsmodell erstellt und mit Messwerten verglichen (Bild 72).

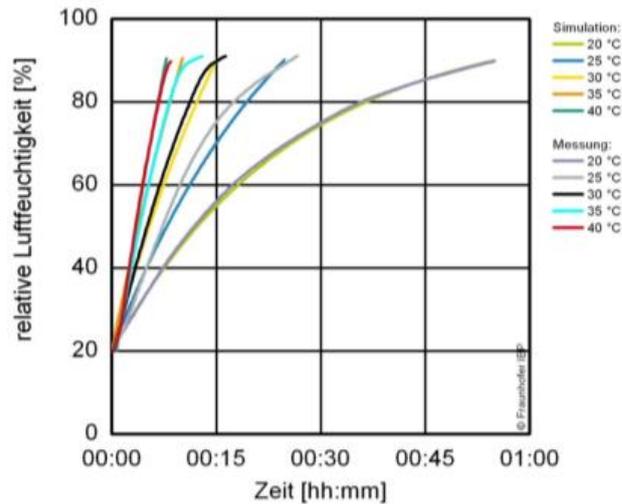


Bild 72:

Vergleich der Simulation der relativen Feuchte mit den Messergebnissen mit Variation der Wassertemperatur.

Man kann erkennen, dass die Deckung zwischen Messung und Simulation bereits recht gut funktioniert.

In den weiterführenden Untersuchungen wurde in einem zweiten Schritt ein weiteres Berechnungsmodell für die Lösung des Funktionsmusters 5 erstellt.

Als Anwendung des entwickelten Berechnungsmodells wird anhand eines Praxisbeispiels die Feuchteerhöhung in einem Modelraum berechnet. Auf Basis der Berechnung sollen die aus den experimentellen Versuchen abgeleiteten Gleichungen verwendet und die allgemein gültige Anwendbarkeit nachgewiesen werden. Die stationären Bilanzen sollen Aufschluss darüber geben, wie sich der Einsatz des Befeuchtungsmoduls auf die hygrischen Raumbedingungen auswirkt [25-Lauss, S.93f].

Als Modellraum wird beispielhaft der in Bild 73 dargestellte Büroraum angenommen. Bei der Berechnung wird festgelegt, dass keine anderen Feuchtquellen (Personen, Pflanzen, etc.) berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird lediglich die abgegebene Wassermenge des Moduls betrachtet und weitere Feuchteinträge die sich zusätzlich auf das Resultat auswirken würden, nicht berücksichtigt. Eine weitere Randbedingung ist, dass der Nutzer den Luftwechsel über die Fenster („Worst-Case-Szenario“) sicherstellt und die Berechnungen über einen Zeitraum von zwei Stunden betrachtet werden. Nachstehend werden drei verschiedene Szenarien betrachtet, bei denen die erreichbare Befeuchtungsleistung und die resultierende Feuchteerhöhung berechnet werden. Tabelle 8 zeigt die zur Berechnung benötigten Ausgangsbedingungen.



Bild 73:
Beispielhafte Darstellung eines Einzelbüros.

Tabelle 8:
Eingabedaten zur Anwendung des Berechnungsmodells.

Parameter	Wert	Kommentar
Raumgeometrie (Länge x Breite x Höhe) [m]	4 x 3 x 2,6	Raumfläche = 12,0 m ² , Raumvolumen = 31,2 m ³
Abmessungen Außenfenster [m]	3 x 1,6	Fensterfläche = 4,8 m ²
Raumluftzustand: Lufttemperatur [°C], Luftfeuchte [%]	20, 30	Absolute Feuchte = 5,166 g/m ³
Außenluftzustand: Lufttemperatur [°C], Luftfeuchte [%]	-5, 90	Absolute Feuchte = 3,035 g/m ³
Luftwechsel [h-1]	1,0	Laut DIN EN 12831
Bauphysikalische Aufbauten: U _w / U _{AW} [W/m ² K]	1,3 / 0,28	Laut EnEV 2014 (Referenz- Nichtwohngedäude)
Norm-Außentemperatur [°C]	-14	Standort München
Heizkörpernormleistung [W]	814	Abmessungen: 600 x 600 x 80 mm, Type 21

Bevor die drei Szenarien erläutert werden, wird vorerst die allgemeine Anwendung und deren Rechenschritte erklärt. Zunächst wird anhand der physikalischen Gesetzmäßigkeiten aus den jeweiligen Luftzuständen der Wert für die absolute Feuchte abgeleitet. Die Differenz von absoluter Feuchte zwischen innen und außen beziffert die benötigte Wasserdampfmenge pro m³ Luft. Zur

Einhaltung des vorgegebenen Raumlufzustandes sind somit bei definierter Luftwechselrate im betrachteten Zeitraum von zwei Stunden 133 g Wasser in den Raum einzubringen.

Als nächster Schritt wird unter Berücksichtigung des gewählten Standorts, mittels DIN EN 12831, eine Heizlastberechnung zur Dimensionierung des Energieabgabesystems durchgeführt. Der Transmissionswärmeverlust beläuft sich auf 237 W und die Lüftungswärmeverluste betragen 353 W. Zur Sicherstellung der Raumlufttemperatur von 20 °C bei Norm-Außentemperatur muss in dem Büro eine Heizlast von 589 W mittels Heizkörper gedeckt werden. Auf Basis der „2. Heizkörpergleichung“ wird nach der folgenden Formel die zur Verfügung stehende Heizleistung bei festgelegten Betriebsbedingungen berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{Betrieb,VL/RL/L}} = \dot{Q}_{\text{Norm,75/65/20}} * \left(\frac{\Delta\vartheta_{\text{Betrieb,VL/RL/L}}}{\Delta\vartheta_{\text{Norm,75/65/20}}} \right)^n [\text{W}]$$

In Abhängigkeit dieser Größe kann die Menge an Heizkörpern bestimmt und in weiterer Folge, die entsprechende Anzahl von eingesetzten Modulen festgelegt werden.

Hierzu verwenden wir die in den Versuchen ermittelten Kennlinien des Funktionsmusters 5. Bild 74 und Bild 75 zeigen den anhand der Messungen ermittelten Zusammenhang zwischen der gewählten Vorlauftemperatur des Heizkörpers und des Luftvolumenstroms sowie der Befeuchtungsleistung des Funktionsmusters.

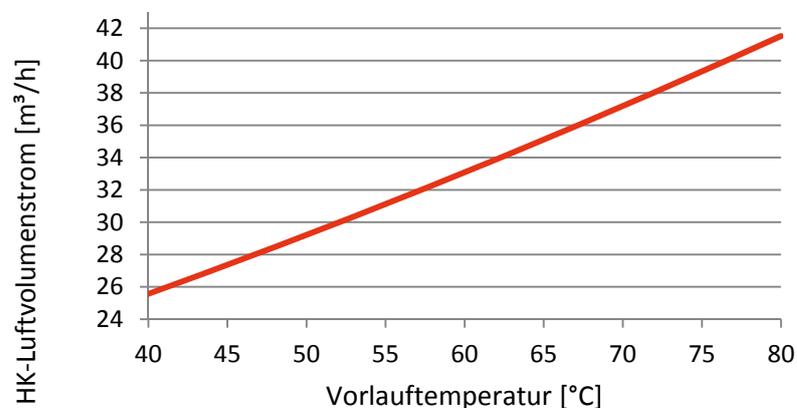


Bild 74:
Luftvolumenstrom-Kennlinie des Funktionsmusters 5.

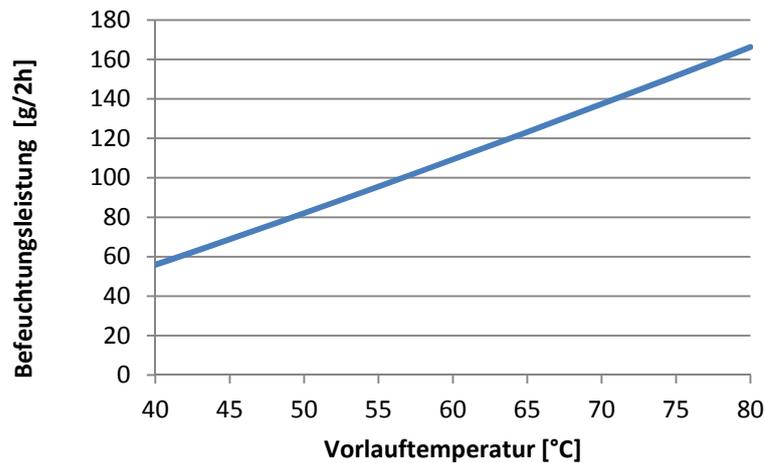


Bild 75:
Befeuchtungsleistungs-Kennlinie des Funktionsmusters 5.

Nun sollen beispielhaft 3 Szenarien mit dem Ziel durchgerechnet werden, anhand des Berechnungsmodells die notwendige Anzahl an Heizkörpern und Befeuchtungsmodulen zu ermitteln, um den gewünschten Anstieg der relativen Luftfeuchte um 10 Prozent zu erreichen. Dies ermöglicht eine planerische Auslegung der Komponenten.

Hierzu wird jeweils anhand der Kennlinien aus Bild 74 und Bild 75 die eingebrachte Wassermenge bestimmt und mit dem Bedarf abgeglichen. Die Szenarien beziehen sich allesamt auf das beschriebene Büromodul und variieren hinsichtlich der gewählten Vorlauftemperatur.

Tabelle 9:
Berechnungsergebnisse Szenario 1 mit Betriebstemperatur HK 65/50 °C, 1 Modul.

Parameter	Wert	Kommentar
Benötigte Wasserdampfmenge [g/2h]	133	Abhängig von Luftzustand (innen, außen), Luftwechsel und Raumvolumen
Raum-Heizlast [W]	589	Nach DIN EN 12831
Heizkörperleistung (Betriebszustand) [W]	558	$\vartheta_{VL} = 65 \text{ °C}$, $\vartheta_{RL} = 50 \text{ °C}$ (\rightarrow 1 HK, 1 Modul)
Heizkörper-Luftvolumenstrom [m ³ /h]	35,1	Laut Formel (6.1)
Befeuchtungsleistung [g/2h]	133	Feuchtedifferenz = 0 g/2h
Raumluftfeuchte [%]	30	$\phi_{Ist} = \phi_{Soll}$

Mit einer Heizkörper-Betriebstemperatur laut Szenario 1 kann die benötigte Heizlast nicht vollständig gedeckt werden. Genau genommen müssten in diesem Fall zwei Heizflächen vorgesehen werden. In der Praxis würde unter Berücksichtigung der internen Wärmegewinne die Dimensionierung mit einem Heizkörper ausreichen und die Differenz von 31 W vernachlässigt werden. Zur Demonstration des Berechnungsmodells wird die praxisnahe Variante gewählt.

In Abhängigkeit des Temperaturniveaus wird durch die Heizfläche dann ein Luftvolumenstrom von 35,1 m³/h umgewälzt. Bei vollständiger Durchmischung des Konvektionsstroms mit der Raumluft würde in diesem Szenario die Luft ungefähr einmal pro Stunde durch den Heizkörper strömen. In Kombination mit dem Befeuchtungsmodul können anhand der Luftumwälzung 133 g Wasserdampf in zwei Stunden eingebracht werden. Dieser erreichbaren Befeuchtungsleistung steht, unter Berücksichtigung der definierten Randbedingungen, eine benötigte Wasserdampfmenge von 133 g/2h gegenüber. Das bedeutet, der erforderliche Wert von 30%rF. wird exakt erreicht.

Tabelle 10:
Szenario 2 mit Betriebstemperatur HK 50/40 °C, 2 Module.

Parameter	Wert	Kommentar
Benötigte Wasserdampfmenge [g/2h]	133	Abhängig von Luftzustand (innen, außen), Luftwechsel und Raumvolumen
Raum-Heizlast [W]	589	Nach DIN EN 12831
Heizkörperleistung (Betriebszustand) [W]	328	$\vartheta_{VL} = 50 \text{ °C}$, $\vartheta_{RL} = 40 \text{ °C}$ (→ 2 HK, 2 Module)
Heizkörper-Luftvolumenstrom [m ³ /h]	29,2	Laut Formel (6.1)
Befeuchtungsleistung [g/2h]	197	Feuchteüberschuss = 64 g/2h
Raumluftfeuchte [%]	35,9	$\phi_{Ist} > \phi_{Soll}$

Aufgrund der Tatsache, dass bei den definierten Randbedingungen ein Heizkörper 328 W abgibt und die Raum-Heizlast 589 W beträgt, müssen zwei Heizflächen vorgesehen werden. Beide Heizkörper werden mit einem Befeuchtungsmodul bestückt. Durch die Anwendung der oben beschriebenen Kennlinien wird durch die beiden Module innerhalb von zwei Stunden eine Wassermenge von 197 g in den Raum eingebracht. Das bedeutet, dass über den betrachteten Zeitraum durch den Einsatz der Module ein Feuchteüberschuss erreicht wird und ein Raumluftzustand von 20 °C / 30 %r F. gewährleistet werden kann. In diesem Fall wird durch den eingebrachten Wasserdampf nach zwei Stunden eine Raumluftfeuchte von 32,9 Prozent bzw. 35,9 Prozent erreicht.

Tabelle 11:
Szenario 3 mit Betriebstemperatur HK 50/40 °C, 1 Modul.

Parameter	Wert	Kommentar
Benötigte Wasserdampfmenge [g/2h]	133	Abhängig von Luftzustand (innen, außen), Luftwechsel und Raumvolumen
Raum-Heizlast [W]	589	Nach DIN EN 12831
Heizkörperleistung (Betriebszustand) [W]	328	$\vartheta_{VL} = 50 \text{ °C}$, $\vartheta_{RL} = 40 \text{ °C}$ (→ 2 HK, 1 Modul)
Heizkörper-Luftvolumenstrom [m³/h]	29,2	Laut Formel (6.1)
Befeuchtungsleistung [g/2h]	98	Feuchtedifferenz = 35 g/2h
Raumluftfeuchte [%]	26,8	$\phi_{Ist} < \phi_{Soll}$

Würde man anstelle zweier Heizkörper nur eine Heizfläche mit Befeuchtungsmodul bestücken, hätte das folgende Auswirkungen. Der benötigten Wassermenge von 133 g in den zwei Stunden stehen nun 98 g übertragene Feuchtigkeit gegenüber. Folglich könnten die 30 Prozent Raumluftfeuchte nicht mehr erreicht werden und es würde sich nach zwei Stunden ein Wert von 26,8%rF. einstellen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass anhand des Berechnungsmodells, Voraussagen zur erreichbaren Feuchteerhöhung infolge des Moduls getroffen werden können. Einschränkend sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich einerseits um ein statisches Modell handelt und daher keine dynamischen Prozesse, wie z.B. Feuchtespeicherung berücksichtigt werden. Andererseits sind die entwickelten Formeln aus den experimentellen Untersuchungen mit einem definierten Kompaktheizkörper abgeleitet und dürfen daher auch nur unter diesen Randbedingungen verwendet werden. Nichtsdestotrotz ist das Modell für die praktische Vorauslegung zum Erreichen gewünschter Raumluftzustände geeignet. Außerdem kann mit dem Rechenmodell ein Vergleich der Befeuchtungsleistung hinsichtlich der unterschiedlichen Betriebsweisen und –temperatur erfolgen. Anhand der Stellschrauben können beliebige Räume abgebildet und deren hygrisches Verhalten durch den Einsatz der Befeuchtungsmodule simuliert werden. Mit dem Rechenmodell wird somit die Grundlage zur Berechnung der erreichbaren relativen Luftfeuchte unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen geschaffen.

5 Ergebnisinterpretation

Das Projekt konnte das große Potential der untersuchten Ionomer-Membrane für eine effiziente und energiesparende Raumluftbefeuchtung aufzeigen. Die ermittelten Befeuchtungsleistungen in den Kurz- und Langzeituntersuchungen liegen angesichts der verwendeten sehr kleinen wirksamen Übertragungsflächen durchwegs in einem für die industrielle Anwendung und Umsetzung sehr attraktiven Bereich. Sowohl als dezentrale wie auch als zentrale Befeuchtungskomponente kann die Lösung Verwendung finden. Bereits bei sehr niedrigen Wassertemperaturen werden sehr hohe Übertragungsraten erreicht und ermöglichen im Verhältnis zu bestehenden Lösungen einen sehr energieeffizienten Betrieb. Über die Wassertemperatur kann die Befeuchtungsleistung sehr gut beeinflusst und damit präzise gesteuert werden. Die Wärmeenergie für den Phasenübergang in Form der notwendigen Verdampfungsenthalpie des Wassers wird fast ausschließlich dem Befeuchtungswasser entzogen und kann somit kosteneffizient und einfach im Befeuchtungswasser kompensiert werden. Über eine geeignete Konfektionierung von Volumenstrom und gewünschter Befeuchtungsleistung können über die Wassertemperatur Einstellungen gefunden werden, welche die Lufttemperatur trotz der Befeuchtung konstant halten. Die dezentrale passive Lösung des Funktionsmusters 5 zeigt eine besonders attraktive Lösung auf, da sie praktisch in jedem Haushalt und Bürogebäude auf einfache Art nachgerüstet werden kann, solange Heizkörper als Heizquelle vorhanden sind. Da die Raumluftfeuchte lediglich in den Wintermonaten bei sehr kalten Außentemperaturen ein Problem bildet, besteht zudem ein perfekter Zusammenhang zum aktiven Betrieb des Heizkörpers. Das dargestellte Beispiel anhand des im Verhältnis zur sehr kleinen Befeuchtungskomponente relativ großen Testraumes zeigt das große Leistungspotential dieser Lösungsvariante.

Die entworfenen und produzierten Funktionsmuster zeigen praxisnahe Anwendungsmöglichkeiten einer industriellen Umsetzung auf. Somit kann eine unmittelbare und wertschöpfende Verwertung der Ergebnisse erfolgen.

Die Untersuchungen zur Luft- und Wasserhygiene haben aufgezeigt, dass die Membrane etwaige Verschmutzungen und Verkeimungen des Wassers sicher vom Luftstrom abtrennt. Man muss jedoch aufgrund der hohen Befeuchtungsleistung darauf achten, dass sich auf der Luftseite keine Ablagerungen auf der Membranfläche oder an den Strömungskanten bilden, die dann einen Nährboden für eine mögliche Verkeimung bilden können. Achtet man auf die richtigen Betriebsbedingungen und den richtigen Einbau der Membran kann jedoch ein sehr hygienischer Betrieb sicher gestellt werden.

Mögliche Verbesserungspotentiale liegen hierbei noch in einer möglichen Oberflächenbeschichtung der Membrane auf der Luftseite z.B. mit Silberionen, um noch längere Standzeiten zu sichern. In den offenen dezentralen Anwendungen des Funktionsmusters 5 konnten keinerlei Ablagerungen festgestellt werden. Durch die manuelle Befüllung und die unmittelbare Einsehbarkeit der Membranoberfläche stellt dies auch aus Sicht der Lufthygiene eine Lösung mit sehr hohem Umsetzungspotential dar.

Zusätzliche Verbesserungspotentiale liegen hierbei vor allem im Bereich des Wasserreservoirs, das man im wirksamen Wasservolumen gegenüber den verwendeten Funktionsmustern noch deutlich verringern kann. Es genügt im Grunde nur ein dünner Wasserfilm, so dass immer vollflächig Wasser an der Membran ansteht. Das verbessert die Hygiene durch die Minimierung des stehenden Wasservolumens in der Befeuchtungseinheit. Über ein Regelventil kann die Wasserzufuhr einfach und schnell unterbunden werden, was zu einem sehr raschen Trocknen der Membran für gewünschte Stillstands-Zeiten sorgt.

Ein Problemfeld resultiert aktuell noch aus den Kosten für derartige High-Tech-Membrane. Da sie bislang nur in Spezialanwendungen zum Einsatz kommen, ist der Preis recht hoch. Das Basismaterial ist jedoch ein einfaches Kunststoffgranulat das gut verarbeitet werden kann, so dass davon auszugehen ist, dass sich der Preis deutlich reduzieren kann, wenn eine Anwendung im Baubereich mit großem Flächenbedarf erfolgt. Die Industriepartner rechnen aktuell mit etwa 200€/m². Dies würde für das Funktionsmuster 3 etwa 20-30€ bedeuten. Für die durchgeführten Versuche lagen die Kosten für eine Membrane (0,09m²) jedoch noch bei etwa 200€.

6 Verwertungsplan

Neben den üblichen Verwertungswegen auf Fachkonferenzen, Tagungen und Messen zielt das Ergebnis der Untersuchung aufgrund des hohen Nutzungspotentials vor allem auf eine rasche und zielgerichtete industrielle Umsetzung und Anwendung. Hierzu müssen sowohl im Engineering zur Herstellung geeigneter Membranen wie auch im Design der Befeuchtungskomponenten noch Aufgaben gelöst werden. Zudem müssen die Kosten für das Basismaterial durch größere Produktionsmengen deutlich gesenkt werden. Das Projekt konnte jedoch an den einfach konzipierten Funktionsmustern das erzielbare Potential und die technische Machbarkeit nachweisen, so dass der Umsetzungsschritt für die Industrie leistbar erscheint. Gerade die sehr simpel konzipierte dezentrale passive Lösung als Heizkörperaufsatz konnte sowohl in den Leistungswerten wie auch in den Fragen der Energieeffizienz und der Lufthygiene überzeugen. Aufgrund der sehr guten Regelbarkeit der Befeuchtungsleistung über die Wassertemperatur können neben üblichen Anwendungsfällen in Gebäuden mit hohen Luftvolumenströmen auch Anwendungsfelder mit der Anforderung an sehr präzise Feuchtwerte realisiert werden. Im Falle des am Projekt beteiligten Unternehmens Kurecon konnte gezeigt werden, dass die Lösungen das notwendige Potential aufweisen, um auch für sehr sensible Warentransporte eine passende und heute am Markt nicht verfügbare Lösung zu stellen. Hierbei geht es nicht nur um den Transport von hochwertigen Kulturgütern, auch Anwendungen im Bereich von Pharma- bzw. Lebensmittelprodukten sind denkbar.

Durch die unmittelbare Beteiligung der Unternehmen am Projekt wurden von Beginn an praxisnahe Lösungen verfolgt, welche ein auf die Bedürfnisse und aktuellen Problemstellungen zugeschnittene Verwertung ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Leindecker H.: *Energieeffizientes und nachhaltiges Bauen*, Fachhochschule Wels, 2014, Vorlesung, Studiengang: Öko-Energietechnik
- [2] Deutsches Netzwerk Büro: *Zu trockene Luft im Büro* [online], 2016, [Zugriff am: 27.05.2016]. Verfügbar unter: http://www.tab.de/downloads/357103/Ratgeber_Buero_Trockene_Luft.pdf
- [3] Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse: *Grundlagen zum Raumklima und zur Raumluftechnik* [online], 2014, [Zugriff am: 01.05.2016], Verfügbar unter: http://etf.bgetem.de/htdocs/r30/vc_shop/bilder/firma53/s_042_a10-2014_neu.pdf
- [4] Guggenbichler P., Hüster R., Geiger S.: *Luftfeuchtigkeit und Immunabwehr - Die Rolle der Schleimhaut und Auswirkungen auf die Klimatechnik* [online], 2007, [Zugriff am: 29.07.2016], Verfügbar unter: http://www.hlk.co.at/upload/pdf/fachartikel/guggenbichler_1007.pdf
- [5] Tugendheim S.: *Mukoziliäre Clearance* [online], 2016, [Zugriff am: 15.08.2016]. Verfügbar unter: http://www.tugendheim.de/wissen/grippe_vs_infekt/clearance.html
- [6] Krühne H., Finke U., Fitzner K.: *Wirksamkeit von mobilen Einrichtungen zur Luftbefeuchtung*, 1. Auflage, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2000, ISBN 3-89701-460-2
- [7] Gräber M.: *Der Facility Manager – Raumlufbefeuchtung* [online], 2014, [Zugriff am: 27.04.2016], Verfügbar unter: <http://www.draabe.de/m/0/facility-management-grundwissen-raumlufbefeuchtung.pdf>
- [8] Iselt P., Arndt U.: *Grundlagen der Luftbefeuchtung*, 1. Auflage, Heidelberg: C. F. Müller Verlag, 1996, ISBN 3-7889-7537-6
- [9] Amstutz S.: Hochschule Luzern - SBiB-Studie (Schweizerische Befragung in Büros) [online], 2010, [Zugriff am 27.04.2016], Verfügbar unter: <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/18922.pdf>
- [10] Bischof W., Bullinger-Naber M., Kruppa B., Müller B., Schwab R.: *Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden – Ergebnisse des ProKlimA-Projektes*, 1. Auflage, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003, ISBN 3-8167-6408-8
- [11] Recknagel H., Sprenger E., Schramek E.: *Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik*, 73. Auflage, München: Oldenburg Industrieverlag, 2008, ISBN 978-3-8356-3104-5
- [12] Steger H., Sieghart J., Glauning E.: *Technische Mechanik 2 – Festigkeitslehre, Kinematik, Kinetik, Hydromechanik*, 5. Auflage, Wien: öbv & hpt Verlag, 2005, ISBN: 3-209-02816-8
- [13] Henne E.: *Luftbefeuchtung*, 4. Auflage, München: Oldenburg Verlag, 1995, ISBN 3-486-

26289-0

- [14] Chemie.de: *Verdunstung* [online], 2016, [Zugriff am: 18.06.2016], Verfügbar unter: <http://www.chemie.de/lexikon/Verdunstung.html>
- [15] Keller L.: *Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlage*, 4. Auflage, München: Deutscher Industrieverlag, 2014, ISBN 978-3-8356-7144-7
- [16] Schlagnitweit H., Wagner H.: *Heizungs- und Lüftungsinstallation*, Wien: Verlag Jugend & Volk, 2006, ISBN: 978-3-7100-1416-1
- [17] Henne E.: *Luftbefeuchtung*, 4. Auflage, München: Oldenburg Verlag, 1995, ISBN 3-486-26289-0
- [18] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften: *Gesund und fit im Kleinbetrieb – Klima im Büro* [online], 2007, [Zugriff am: 11.06.2016], Verfügbar unter: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi7004.pdf>
- [19] Krühne H., Finke U., Fitzner K.: *Wirksamkeit von mobilen Einrichtungen zur Luftbefeuchtung*, 1. Auflage, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2000, ISBN 3-89701-460-2
- [20] Schütz P.: *Luftbefeuchtung* [online], 2004, [Zugriff am: 25.09.2016], Verfügbar unter: <http://www.bosy-online.de/Raumlufttechnik/Luftbefeuchtung.htm>
- [21] Hartmann T., Reichel D., Richter W.: *Wohnungslüftung und Raumklima - Feuchteabgabe in Wohnungen*, 2. Auflage, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006
- [22] Jehle, Walter; Schreiber, Robert, 2009: Air Humidifier, WO 2010/020220 A1
- [23] Lucy Mar Camacho; Ludovic Dumée; Jianhua Zhang; Jun-de Li; Mikel Duke; Juan Gomez; Stephen Gray, 2013: Advances in Membrane Distillation for Water Desalination and Purification Applications
- [24] Arcilla, Mabini, 2012: Proximal humidifier comprising hydrophobic membrane, WO 2012/077052 A1
- [25] Lauss, Lukas: Experimentelle Untersuchung und Bewertung eines Moduls zur Raumluftbefeuchtung unter Nutzung des Konvektionsstroms von freien Heizflächen, Fraunhofer IBP, 2017

Bildverzeichnis

Bild 1: Funktionsschema „Mukoziliäre Clearance“ und Aufbau der Bronchialschleimhaut [5-Tugendheim 2016].	9
Bild 2: Raumlufffeuchte und menschlich-biologische Wechselwirkungen [8-Iselt 1996, S.44 - Eigene Darstellung].	11
Bild 3: Auszug aus der DIN 15251 2007.	11
Bild 4: hx-Diagramm mit Darstellung der kritischen Konstellation für Bürogebäude.	12
Bild 5: Beeinträchtigende Umgebungsbedingungen nach Häufigkeit [9-Amstutz 2010, S.40 - Eigene Darstellung].	13
Bild 6: Beurteilung und Beeinträchtigung durch das Raumklima [10-Bischof 2003, S.88 - Eigene Darstellung].	14
Bild 7: Funktionsbild Luftwäscher [16-Schlagnitweit 2006, S.179].	18
Bild 8: Funktionsbild Dampfbefeuchter [18-HVBG 2007, S.11].	19
Bild 9: Funktionsbild Ultraschallbefeuchter [11-Recknagel 2008, S.1208].	20
Bild 10: Funktionsbild Verdunstungsbefeuchter [20-Schütz 2016].	21
Bild 11: Abbildung einer Nafion® Membran sowie der chemischen Formel.	26
Bild 12: Abbildung der VANADion® Membran.	27
Bild 13: Schematische Übersicht über die Feuchtetransportphänomene in porösen mineralischen Baustoffen.	27
Bild 14: Skizze der Trocken- (A) und Feuchtebereichsverfahrens (B).	28
Bild 15: „Wet-“ und „dry-cup“ Versuche mit der VANADion® Membran.	30
Bild 16: Schematische Darstellung von Funktionsmuster 1.	30
Bild 17: Funktionsmuster 1 und Ermittlungsschema der wirksamen Übertragungsfläche.	31
Bild 18: Funktionsmuster 2.	31
Bild 19: Konstruktionszeichnung von Funktionsmuster 3.	32
Bild 20: Funktionsmuster 3 – Außen- und Innenansicht.	33
Bild 21: Funktionsmuster 4.	33
Bild 22: 3D-Ansicht und Schnitt des Funktionsmusters 5.	34

Bild 23: Horizontal- und Vertikalschnitt des Funktionsmusters 5.	34
Bild 24: Horizontal- und Vertikalschnitt des Funktionsmusters 5.	35
Bild 25: Foto eines verwendeten Tauchfühler-Temperatursensors (Maße in mm) [Eigene Darstellung].	36
Bild 26: Foto eines verwendeten kapazitiven Feuchtefühlers (Maße in mm) [Eigene Darstellung].	37
Bild 27: Kalibrierung der Feuchtesensoren.	37
Bild 28: Abbildung einen der verwendeten Hitzdrahtanemometer.	38
Bild 29: Foto des verwendeten magnetisch-induktiven Durchflusssensors (Maße in mm) [Eigene Darstellung].	39
Bild 30: Schematisches Messprinzip PIV.	40
Bild 31: Abbildung der Emissionsprüfkammer - VCE1000 und Lauda Wasserumlaufkühler.	42
Bild 32: Messaufbau in Klimakammer für Funktionsmuster 1 und 2.	43
Bild 33: Messaufbau zur Untersuchung der Befeuchtungsleistung in zentralen Lüftungsanlagen.	44
Bild 34: Messaufbau zur Untersuchung der Langzeitwirkung.	45
Bild 35: Klimakammer IATC zur Untersuchung des dezentralen Funktionsmusters 5.	46
Bild 36: Messaufbau zum Betrieb des Heizkörpers in der Messkammer.	47
Bild 37: Messaufbau zum Betrieb des Funktionsmusters 5.	47
Bild 38: Messaufbau zum Betrieb des Funktionsmusters 6.	48
Bild 39: Relative Luftfeuchtigkeit (A) und Wassertemperatur (B) bei der Variation von stehendem und fließendem Wasser an der Membraninnenfläche.	49
Bild 40: Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Anstieg der Wassertemperatur.	50
Bild 41: Relative Luftfeuchte der Messung zwei GORE-Tex® Membrane.	51
Bild 42: Tropfenbildung an der Oberfläche der GORE-Tex® Membran.	51
Bild 43: Abbildung einer Tyvek®-Folie.	52
Bild 44: Messwerte zur zentralen Luftbefeuchtung mit Funktionsmuster 3.	53
Bild 45: Messverlauf über mehrere Tage.	55

Bild 46: Einfluss der Wassertemperatur auf die Befeuchtungsleistung.	56
Bild 47: Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung.	57
Bild 48: Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung der Tyvek®-Membran.	58
Bild 49: Konvektionsermittlung anhand von PIV mit Abbildung des Strömungsfeldes.	59
Bild 50: Messergebnisse der Befeuchtungsleistung für Funktionsmuster 5.	62
Bild 51: Messergebnisse des Funktionsmusters 5 mit einem Raumlufthechsel von 0,5/h.	63
Bild 52: Messergebnisse der Luft-zu-Luft Messung.	64
Bild 53: Messergebnisse der Luft-zu-Luft Messung ohne zusätzliche Luftströmung.	65
Bild 54: Messergebnisse der Luft-zu-Luft Messung mit feuchteadaptiver Polyamid-Membran ohne zusätzliche Luftströmung.	66
Bild 55: Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung mit Trendlinie für Osmosewasser.	67
Bild 56: Langzeitmessung der Befeuchtungsleistung mit Trendlinie für Normalwasser.	68
Bild 57: Kalkablagerungen auf der Innenseite der Membran mit Normalwasser.	68
Bild 58: Luftbefeuchter mit Wasserreservoir.	69
Bild 59: Membran 1 mit deutlichen Verfärbungen auf der der Luft angeströmten Seite.	70
Bild 60: Membran 2 mit weniger Verfärbungen.	70
Bild 61: Ansatz einer Verdünnungsreihe.	71
Bild 62: Versuchsaufbau für die Luftkeimmessung der durch das Gerät angesaugten Luft.	72
Bild 63: Detailansicht der stärker verfärbten Membran mit den für die Mikroskopie ausgestanzten Löchern.	73
Bild 64: Ablagerungen mit stäbchenförmigen Bakterien (Membran 1).	74
Bild 65: Verdunkelungen und reliefartige Strukturen in Form von stäbchenförmigen Bakterien (Membran 1).	75
Bild 66: Verdunkelungen und reliefartige Strukturen in Form von stäbchenförmigen Bakterien.	75

Bild 67: Verdunkelungen und reliefartige Strukturen in Form von stäbchenförmigen Bakterien.	76
Bild 68: Fädige Strukturen auf, die Merkmale von Pilzhypen aufweisen.	77
Bild 69: Fädigen Strukturen, die zum Zentrum eines Myzels zusammenlaufen.	77
Bild 70: Myzelzentrum mit Resten mehrerer Sporenträger.	78
Bild 71: Verschiedene kleine Partikel.	78
Bild 72: Vergleich der Simulation der relativen Feuchte mit den Messergebnissen mit Variation der Wassertemperatur.	80
Bild 73: Beispielhafte Darstellung eines Einzelbüros.	81
Bild 74: Luftvolumenstrom-Kennlinie des Funktionsmusters 5.	82
Bild 75: Befeuchtungsleistungs-Kennlinie des Funktionsmusters 5.	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Grenz- und Richtwerte der relativen Feuchte.	8
Tabelle 2: Feuchteabgaben menschlicher Aktivitäten [21-Hartmann 2006, S.117].	22
Tabelle 3: Übersicht Verwertungsziele und Anforderungen der Industriepartner.	24
Tabelle 4: Ergebnisse der Feuchte- und Trockenbereichsverfahrens:	29
Tabelle 5: Randbedingungen der PIV-Messung des Konvektionsstroms.	59
Tabelle 6 Ermittelte Strömungsgeschwindigkeiten im Versuchsaufbau.	61
Tabelle 7: Bakterienbelastung der Luftkeimmessungen.	74
Tabelle 8: Eingabedaten zur Anwendung des Berechnungsmodells.	81
Tabelle 9: Berechnungsergebnisse Szenario 1 mit Betriebstemperatur HK 65/50 °C, 1 Modul.	83
Tabelle 10: Szenario 2 mit Betriebstemperatur HK 50/40 °C, 2 Module.	84
Tabelle 11: Szenario 3 mit Betriebstemperatur HK 50/40 °C, 1 Modul.	85