

BA 007



Bachelorarbeit

Design von Bachelorarbeiten

Design of bachelor's thesis

Aachen, Januar 2050

Dein Name

Matrikelnummer: 000815

betreut von:

Dipl.-Phys. Max Mustermännin
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Die Arbeit wurde vorgelegt am:

E.ON Energy Research Center | ERC
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate | EBC
Mathieustraße 10, 52074 Aachen

Kurzfassung

Überall dieselbe alte Leier. Das Layout ist fertig, der Text lässt auf sich warten. Damit das Layout nun nicht nackt im Raum steht und sich klein und leer vorkommt, springe ich ein: der Blindtext. Genau zu diesem Zwecke erschaffen, immer im Schatten meines großen Bruders »Lorem Ipsum«, freue ich mich jedes Mal, wenn Sie ein paar Zeilen lesen. Denn esse est percipi - Sein ist wahrgenommen werden.

Und weil Sie nun schon die Güte haben, mich ein paar weitere Sätze lang zu begleiten, möchte ich diese Gelegenheit nutzen, Ihnen nicht nur als Lückenfüller zu dienen, sondern auf etwas hinzuweisen, das es ebenso verdient wahrgenommen zu werden: Webstandards nämlich. Sehen Sie, Webstandards sind das Regelwerk, auf dem Webseiten aufzubauen. So gibt es Regeln für HTML, CSS, JavaScript oder auch XML; Worte, die Sie vielleicht schon einmal von Ihrem Entwickler gehört haben. Diese Standards sorgen dafür, dass alle Beteiligten aus einer Webseite den größten Nutzen ziehen. Testtest

Im Gegensatz zu früheren Webseiten müssen wir zum Beispiel nicht mehr zwei verschiedene Webseiten für den Internet Explorer und einen anderen Browser programmieren. Es reicht eine Seite, die - richtig angelegt - sowohl auf verschiedenen Browsern im Netz funktioniert, aber ebenso gut für den Ausdruck oder die Darstellung auf einem Handy geeignet ist. Wohlgemerkt: Eine Seite für alle Formate. Was für eine Erleichterung. Standards sparen Zeit bei den Entwicklungskosten und sorgen dafür, dass sich Webseiten später leichter pflegen lassen. Natürlich nur dann, wenn sich alle an diese Standards halten. Das gilt für Browser wie Firefox, Opera, Safari und den Internet Explorer ebenso wie für die Darstellung in Handys. Und was können Sie für Standards tun? Fordern Sie von Ihren Designern und Programmierern einfach standardkonforme Webseiten. Ihr Budget wird es Ihnen auf Dauer danken. Ebenso möchte ich Ihnen dafür danken, dass Sie mich bin zum Ende gelesen

Diese Kurzzusammenfassung hat 300 Wörter

Abstract

Er hörte leise Schritte hinter sich. Das bedeutete nichts Gutes. Wer würde ihm schon folgen, spät in der Nacht und dazu noch in dieser engen Gasse mitten im übel beleumundeten Hafenviertel? Gerade jetzt, wo er das Ding seines Lebens gedreht hatte und mit der Beute verschwinden wollte! Hatte einer seiner zahllosen Kollegen dieselbe Idee gehabt, ihn beobachtet und abgewartet, um ihn nun um die Früchte seiner Arbeit zu erleichtern? Oder gehörten die Schritte hinter ihm zu einem der unzähligen Gesetzeshüter dieser Stadt, und die stählerne Acht um seine Handgelenke würde gleich zuschnappen? Er konnte die Aufforderung stehen zu bleiben schon hören. Gehetzt sah er sich um. Plötzlich erblickte er den schmalen Durchgang. Blitzartig drehte er sich nach rechts und verschwand zwischen den beiden Gebäuden.

Beinahe wäre er dabei über den umgestürzten Mülleimer gefallen, der mitten im Weg lag. Er versuchte, sich in der Dunkelheit seinen Weg zu ertasten und erstarrte: Anscheinend gab es keinen anderen Ausweg aus diesem kleinen Hof als den Durchgang, durch den er gekommen war. Die Schritte wurden lauter und lauter, er sah eine dunkle Gestalt um die Ecke biegen. Fieberhaft irrten seine Augen durch die nächtliche Dunkelheit und suchten einen Ausweg. War jetzt wirklich alles vorbei, waren alle Mühe und alle Vorbereitungen umsonst? Er presste sich ganz eng an die Wand hinter ihm und hoffte, der Verfolger würde ihn übersehen, als plötzlich neben ihm mit kaum wahrnehmbarem Quietschen eine Tür im nächtlichen Wind hin und her schwang. Könnte dieses der flehentlich herbeigesehnte Ausweg aus seinem Dilemma sein?

Langsam bewegte er sich auf die offene Tür zu, immer dicht an die Mauer gepresst. Würde diese Tür seine Rettung werden? Er hörte leise Schritte hinter sich. Das bedeutete nichts Gutes. Wer würde ihm schon folgen, spät in der Nacht und dazu noch in dieser engen Gasse mitten im übel beleumundeten Hafenviertel? Gerade jetzt, wo er das Ding seines Lebens gedreht hatte und mit der Beute verschwinden wollte! Hatte einer seiner zahllosen Kollegen dieselbe Idee gehabt, ihn beobachtet und abgewartet, um ihn nun um die Früchte seiner Arbeit zu erleichtern? Oder gehörten die Schritte hinter ihm zu einem der unzähligen Gesetzeshüter dieser Stadt, und die stählerne Acht um seine Handgelenke würde gleich zuschnappen? Er konnte die Aufforderung stehen zu bleiben schon hören. Gehetzt sah er sich um. Plötzlich erblickte er den schmalen Durchgang. Blitzartig drehte er sich nach rechts und verschwand zwischen den beiden Gebäuden. Beinahe wäre er dabei über den umgestürzten Mülleimer gefallen, der mitten im Weg lag. Er versuchte, sich in der Dunkelheit seinen Weg zu ertasten und erstarrte: Anscheinend gab es keinen anderen Ausweg aus diesem kleinen Hof als den Durchgang, durch den er gekommen war. Die Schritte wurden lauter und lauter, er sah eine dunkle Gestalt um die Ecke biegen. Fieberhaft irrten seine Augen durch die nächtliche Dunkelheit

und suchten einen Ausweg. War jetzt wirklich alles vorbei, waren alle Mühe und alle Vorbereitungen umsonst? Er presste sich ganz eng an die Wand hinter ihm und hoffte, der Verfolger würde ihn übersehen, als plötzlich neben ihm

Dieser Abstract hat 500 Wörter

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	v
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	ix
Vorwort	x
1 Teil 1	1
1.1 Abschnitt 1	1
Literaturverzeichnis	6
A Wichtiger Anhang 1	8
A.1 Die Versalien	8
B Ähnlich wichtiger Anhang	10

Nomenklatur

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
C	Wärmekapazität	W/kg
H	Enthalpie	J
\dot{H}	Enthalpiestrom	J/s
E	Exergie	J
e	spezifische Exergie	J/kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
p	Druck	Pa
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	spezifische Gaskonstante	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
S	Entropie	J/K
\dot{S}	Entropiestrom	W/K
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
U	innere Energie	J
U_T	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
h	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
\dot{W}	Leistung	W
Y	Wasserbeladung der Luft	g/kg

griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
η_C	Carnot-Wirkungsgrad	—
Φ	thermische Leistung	W
ρ	Massendichte	kg/m ³
σ	Temperaturspreizung	K
ϑ	Temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
0	Referenzzustand (<i>ambient dead state</i>)
A	Außen/Umgebung
CH	chemisch
CV	Kontrollvolumen (<i>control volume</i>)
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie (<i>differential scanning calorimetry</i>)
e	über die Systemgrenze (<i>external</i>)
F	Volumenstrom
FW	Fassadenwärmeübertrager
gen	erzeugt (<i>generated</i>)
In	Eingang (<i>input</i>)
KN	kinetisch
KRM	Kapillarrohrmatte
LabVIEW	Programmiersprache und Entwicklungsumgebung für die Messdatenerfassung der Firma National Instruments
L	Luft
LWS	Latentwärmespeicher
m	Mittelwert
Ob	Oberfläche
PCM	Latentwärmespeichermaterial (<i>phase change material</i>)
PH	physikalisch

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
PT	potentiell
Q	auf einen Wärmestrom bezogen
R	Rücklauf
Reg	Speicherregeneration
T	Temperatur
Δt	Zeitschritt der Länge Δt
t	technisch
V	Vorlauf
V	Verlust (Exergieanalyse)
W	Wärmeträgermedium

Abbildungsverzeichnis

1.1 RWTH-Aachen-Logo	5
--------------------------------	---

Tabellenverzeichnis

1.1 Das ist eine Testtabelle	5
--	---

Vorwort

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut labore et dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi (Tabelle 1.1). Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut labore et dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum.

1 Teil1

1.1 Motivation

Die Bereitstellung von Wärme und elektrischer Energie beeinflusst immer stärker das Klima. Nach wie vor werden zumeist fossiler Energieträger genutzt, um den Energiebedarf zu decken. Um den Einfluss unseres Energiebedarfs auf das Klima zu reduzieren, wurden in den vergangenen Jahrzehnten verschiedene Versuche unternommen, die Energiebereitstellung auf nachhaltige Quellen umzustellen. Ziel ist insbesondere, die Anreicherung von Kohlenstoff als Kohlenstoffdioxid oder in Form anderer klimabeeinflussender Gase, wie zum Beispiel Methan, in der Atmosphäre zu verhindern.

Die am meisten genutzten Energiequellen sind hierbei die Wasserkraft, Wind und Sonne. Dabei ist die Nutzbarkeit aller drei genannten Energiequellen stark von den geologischen, klimatischen und geographischen Bedingungen der jeweiligen Region abhängig und unterliegt in den meisten Regionen starken Leistungsschwankungen. Daher ergeben sich Probleme bei der Speicherung der Energie. Außerdem werden in den nächsten Jahren die Endenergiepreise voraussichtlich steigen, da zum einen eine Verknappung der fossilen Brennstoffe auf lange Sicht unausweichlich ist und zum anderen die Umstellung auf regenerative Energien mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden ist. Deshalb haben in den letzten Jahren die Bemühungen der Politik und verschiedener Marktteilnehmer zugenommen, den Energieverbrauch zu senken. Für privat genutzte Häuser und Wohnungen geschieht das in Deutschland staatsseitig vor allem über die "Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden", kurz EnEV?.

Ziel der EnEV ist es, durch eine gute Dämmung den Wärmeverlust der Häuser zu reduzieren. Um entsprechende Gebäude mit ausreichend Frischluft zu versorgen, wird die Luft mittels eines Lüftungssystems ausgetauscht. Durch den Einsatz von Wärmeübertragern wird der mit dem Luftaustausch verbundene Wärmeverlust reduziert.

Eine Konsequenz dieses Vorgehens in gemäßigten und kalten Klimaregionen ist ein Austrocknen der Raumluft. Die kalte Außenluft weist einen geringen absoluten Wassergehalt auf. Beim Erhitzen im Wärmeübertrager stellt sich so eine sehr geringe relative Feuchte ein. An Wohn- und Bürogebäude werden oft hohe Anforderungen bezüglich der Luftqualität gestellt. Deshalb ist es in vielen Fällen sinnvoll, die Luft auf einen Feuchtegehalt zu konditionieren, der von den Menschen als angenehm empfunden wird und keine negativen Auswirkungen auf ihren Gesundheitszustand oder ihre Leistungsfähigkeit hat. Eine detaillierte Zusammenfassung über die Auswirkungen zu trockener Luft

enthält eine Publikation von Jürgen Schneiders.[?](#)

In feucht warmen Klimazonen tritt oft ein gegenteiliger Effekt ein. Die feucht warme Zuluft wird abgekühlt und gewinnt so an relativer Feuchte. Dies kann dazu führen, dass Feuchteschäden an Bauteilen oder am Interieur des Gebäudes entstehen oder es zur Bildung von Schimmel kommt. Entsprechend ist in vielen Fällen eine Trocknung der zugeführten Luft notwendig. [?](#)

In Sonderfällen ist es möglich, dass bestimmte Raumklimabedingungen eingehalten werden müssen. Zum Beispiel erfordern bestimmte Lagerbedingungen oder Rahmenbedingungen für Produktionsabläufe oder Forschungsprozesse ein definiertes Raumklima. Das Trocknen beziehungsweise Befeuchten der Luft kostet viel Energie. Bei einem Luftbefeuhter muss hierzu die Verdampfungsenthalpie des Wassers überwunden werden. Eine Beschreibung des Energieverbrauchs von klassisch zur Trocknung von Luft eingesetzten Sorptionstrocknern findet sich beispielsweise in [?](#) Enthalpieübertrager stellen eine Möglichkeit da, diesen Energieaufwand zu reduzieren.

1.2 Der Enthalpieübertrager

Aus dem Stand der Technik sind Speicherenthalpieübertrager und membranbasierte Enthalpieübertrager bekannt, wie sie in [??](#) dargestellt sind. Beide Systeme übertragen neben Wärme auch Feuchte von einem feuchten auf einen trockenen Luftstrom. Die Triebkraft in beiden Systemen ist die Differenz des chemischen Potenzials, die ausgeglichen wird.

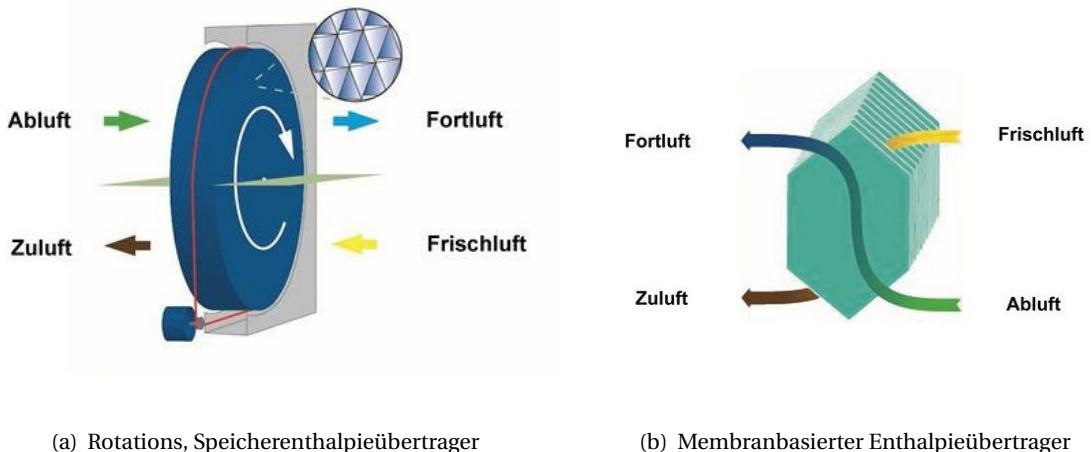


Abbildung 1.1: Verschiedene Ausführungsformen von Enthalpieübertragern

Die verbreitesten Speicherübertrager sind Rotationsübertrager, wie in dargestellt. Rotationsübertrager weisen eine rotierende thermische Masse auf, die sich jeweils mit einem Teil der Masse im

Zuluftstrom und mit einem anderen Teil der Masse im Abluftstrom befindet. Durch die Rotation kann die Masse thermische Energie in einem Luftstrom aufnehmen und nach dem Weiterrotieren in den anderen Luftstrom abgeben. Analog funktioniert die Übertragung der Feuchte, wobei die Feuchte entweder von einem Sorptionsmaterial aufgenommen und wieder abgegeben wird oder in einem Luftstrom an der Masse kondensiert und in dem anderen Luftstrom wieder verdampft. Rotationsübertrager befinden sich bereits seit einigen Jahren kommerziell im Einsatz und wurden entsprechend detailliert untersucht. Ein detailliertes Modell von Rotationsübertragern liefert eine Untersuchung von Zhang². Die Artikel ³ und ⁴ vergleichen unterschiedliche Optionen der Lufttrocknung.

Membranbasierte Enthalpieübertrager sind erst seit wenigen Jahren kommerziell im Einsatz, sodass bisher nur wenige Untersuchungen zu ihnen existieren. Die Wärme wird über die Membran von einem Luftstrom an den anderen übertragen. Analog zum übertragenen Wärmestrom wird die Feuchte übertragen. Das Wasser wird vom Membranmaterial absorbiert, diffundiert durch die Membran und desorbiert auf der anderen Seite in den Luftstrom.

Die Geometrien, die dabei für den Enthalpieübertrager verwendet werden, entsprechen denen, die bei klassischen Wärmeübertragern zum Einsatz kommen. In kommerziellen Anwendungen kommen Kreuzstromübertrager und Kreuzgegenstromübertrager zur Anwendung. Gegenstromübertrager und "hollow fibre" Module stellen weitere mögliche Bauformen dar. Kreuzstromübertrager sind im Vergleich zu Gegenstromübertragern kostengünstig herstellbar und benötigen nur geringen Bauraum. Daher sind sie die bisher häufigste Bauform bei Enthalpietauschern. Gegenstromübertrager haben im Gegensatz dazu einen hohen Wirkungsgrad. Deshalb hält vor allem eine Mischform aus beidem, der Kreuzgegenstromübertrager, immer stärker Einzug in die kommerzielle Nutzung. Eine Darstellung der Bauweise von Hollow fibre Modulen findet sich in ⁵. Sie ermöglichen hohe Übertragungsflächen bei kleinem Bauraum und somit hohe Übertragungsraten für Wärme und Feuchte. Dies erläutern auch die Artikel von Zhang und Bui ⁶ ⁷. Nachteilig ist jedoch ein sehr hoher Druckverlust in den Modulen. Der hohe Druckverlust hat bisher verhindert, dass sich diese Bauform in kommerziellen Anwendungen durchsetzen konnte.

Ein Vergleich zwischen Rotationsübertragern und membranbasierten Enthalpietauschern fällt je nach Untersuchung unterschiedlich aus. Grundlegend haben jedoch membranbasierte Enthalpietauscher den Vorteil, dass sie keine beweglichen (rotierenden) Komponenten haben, was sie weniger verschleißanfällig macht und die Geräuschemissionen senkt. Außerdem muss keine Energie zum Antrieb eines Rotors aufgewendet werden. In den meisten Fällen besitzen membranbasierte Enthalpieübertrager den höheren Wirkungsgrad. ⁸ Nachteilig ist, dass Enthalpieübertrager nicht regelbar sind. Theoretisch ist es daher an feucht warmen Tagen möglich, dass ein Enthalpieübertrager zur Feuchterückgewinnung der Zuluft weiter Wasser zuführt. Dann steigt die bereits hohe relative Feuchte im Gebäude weiter an. Dies könnte nur durch einen Bypass, einen Trockner oder einen

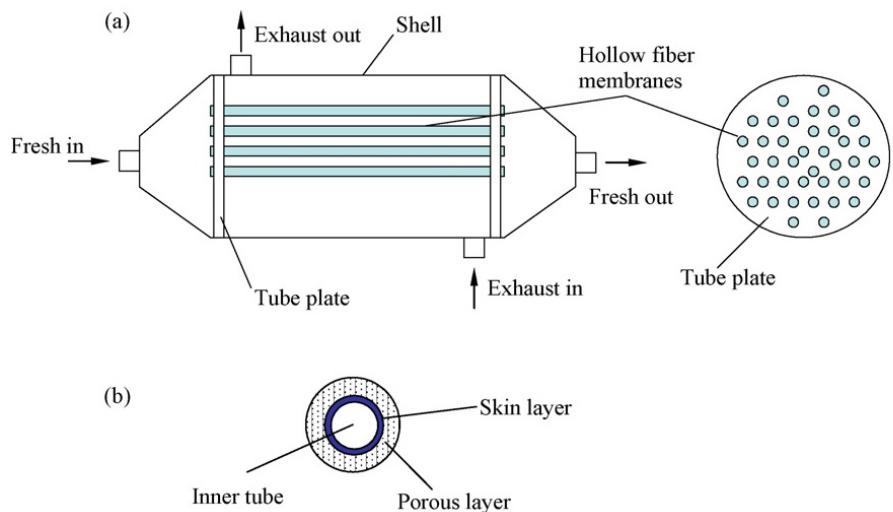


Abbildung 1.2: hollow fibre

temporären Austausch des Enthalpieübertragers durch einen Wärmeübertrager verhindert werden. Außerdem können die membranbasierten Übertrager bei kalten Temperaturen zufrieren und müssen daher in einigen Klimazonen mit Vorheizern ausgestattet werden. Derzeit beherrschen Rotationsübertrager vor allem den Markt bei großen Anwendungsfällen, während Enthalpieübertrager vor allem für Wohnungs- und Einzelraumlüftungen genutzt werden.

1.3 Die Membran

Membranen lassen sich in dichte und poröse Membranen unterteilen. Poröse Membranen weisen Poren auf, die größer sind als die Partikel, die durch die Membran übertragen werden. In der Membrantechnik werden diese Prozesse Micro- oder Ultrafiltration genannt. Sie laufen als konvektive oder kapillare Prozesse ab. Dichte Membranen weisen hingegen keine oder nur sehr kleine Poren auf. Der Stofftransport findet bei dichten Membranen auf Grund von Diffusionsprozessen statt. Dies führt in den meisten Fällen zu einer deutlich erhöhten Selektivität und einer geringeren Permeabilität im Vergleich zu porösen Membranen. Im vorliegenden Anwendungsfall passiert Wasserdampf als Permeat die Membran während kleine gasförmige Moleküle der Luft, wie Stickstoff, zurückgehalten werden. Daher ist eine dichte Membran sinnvoll. Nur so ist eine ausreichende Selektivität gegenüber den gasförmigen Komponenten gewährleistet. ? Um dennoch eine möglichst hohe Permeabilität gegenüber Wasserdampf zu gewährleisten, ist es zielführend eine möglichst dünne Mem-

bran zu verwenden. Die dünne dichte Membran wird in einigen Fällen durch eine poröse Membran gestützt, um diese mechanisch zu stabilisieren. Die poröse Membran hat kaum negative Auswirkungen auf die Permeabilität, da die Transportgeschwindigkeiten in porösen Membranen wesentlich höher sind als in dichten Membranen. Gleichzeitig ist jedoch anzunehmen, dass Spacermaterialien und porösen Membranen Einfluss auf die Strömung und damit auf die Wärmeübergangskoeffizienten und Sorptionseigenschaften an der Membranoberfläche nehmen. ?

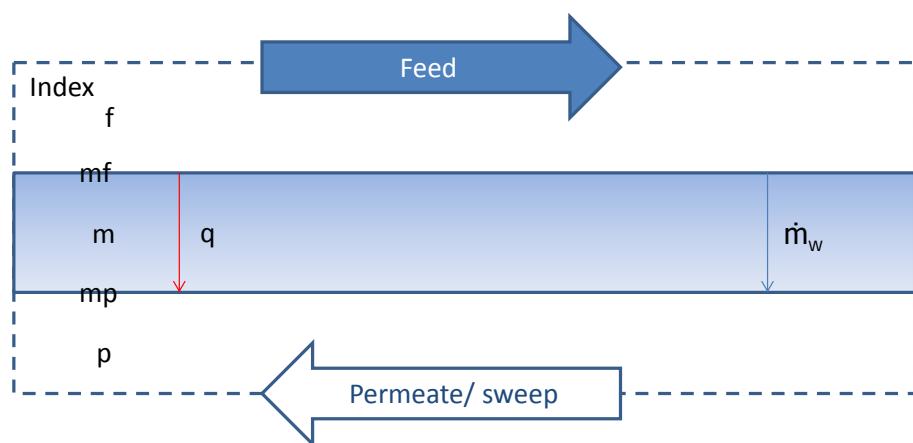


Abbildung 1.3: Membran

In Enthalpieübertragern werden derzeit Membranen aus Polymeren eingesetzt. Bis vor einigen Jahren auch wurden auch Membranen auf Zellulosebasis verwendet. Die technische Weiterentwicklung der Polymermembranen in den letzten Jahren hat dazu geführt, dass mittlerweile fast ausschließlich Polymermembranen zu Einsatz kommen, da diese deutlich höhere Permeabilitäten aufweisen. ?

1.4 Stand der Technik

Bisherige Veröffentlichungen beschreiben vor allem Kennzahlen und die Genauigkeit bestimmter Modell-Ansätze. Für einen Überblick über Veröffentlichungen und den derzeitigen Stand der Technik empfehlen sich vor allem die Artikel [?](#) und [?](#). Als Modelle werden insbesondere Lösungs-Diffusions-Modelle vorgeschlagen. Sie beruhen auf der Annahme, dass Wasserdampf an der Oberfläche der Membran absorbiert wird, durch die Membran diffundiert und auf der gegenüberliegenden Seite wieder an die Luft abgegeben wird. Aus dieser Betrachtungsweise ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, das System eines Enthalpieübertragers zu beschreiben. Grundsätzlich lassen sich die Publikationen in bewertungsorientierte (z.B. [?](#)), komponentenoptimierungsorientierte (z.B. [?](#)) und modellermittelnde Untersuchungen (z.B. [?](#)) unterteilen. Die bewertungsorientierten Arbeiten nutzen für den Vergleich verschiedener Bauweisen, Geometrien und Prinzipien bekannte Bewertungsgrößen wie den Wärmeübertragungsgrad, den Feuchteübertragungsgrad oder den totalen Enthalpieübertragungsgrad sowie die Number of transfer units. Bisherige Untersuchungen zur Modellbildung beziehen sich weitestgehend auf die Bestimmung grundlegender Kenngrößen oder Beschreibungswerte, die analog zu bekannten Systemen definiert wurden. Der Gesamtprozess wird in Teilprozesse unterteilt, die bereits gut beschrieben sind. Auf diese Weise entstehen Modelle, die die Teilprozesse in Beziehung zueinander setzen. So lassen sich die Strömungseigenschaften, die Wärmeübertragung und die Feuchteübertragung getrennt voneinander betrachten. Mit Kennzahlen, die ggf. von bestimmten Parametern abhängen, sind diese miteinander Verknüpfbar.

In dieser Arbeit soll im Gegensatz dazu ein Modell eines kommerziell einsatzfähigen Enthalpieübertragers ermittelt werden. Dabei liegt der Schwerpunkt nicht auf der Ermittlung der physikalischen Grundwerte oder Gültigkeit der physikalischen Modelle und der zu Grunde liegenden Annahmen. Stattdessen wird das Verhalten des praktisch eingesetzten Systems unter bestimmten Umgebungsbedingungen und in bestimmten Anwendungsfällen untersucht. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem deutschen Klimaraum und dem Einsatz in Wohnraumlüftungen. Ziel ist es, ein Modell zu generieren, das abhängig von Anforderungsprofilen und Umgebungsbedingungen eine Bewertung der Enthalpieübertrager insbesondere im Vergleich zu alternativen Systemen, wie z.B. Speicherenthalieübertragnern und klassischen Wärmeübertragnern mit entsprechender Lufttrocknung ermöglicht. Zu diesem Zweck sollen auch Bewertungsgrößen definiert werden, die einen sinnvollen Vergleich der verschiedenen Größen zulassen.

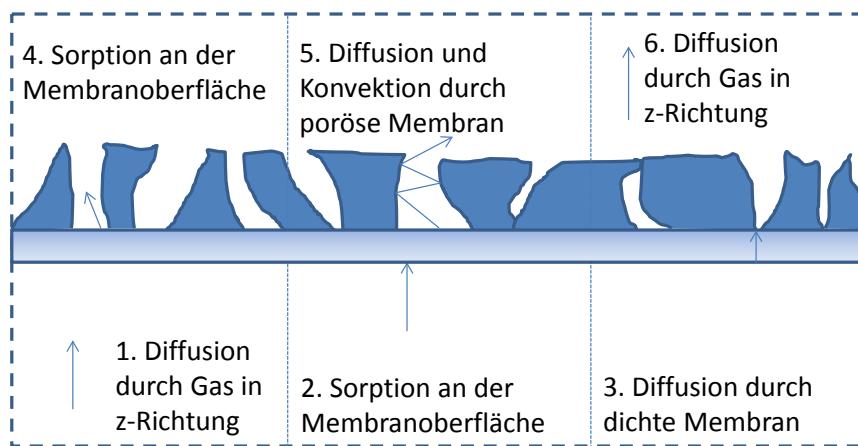
2 Teil2

2.1 Modell

2.1.1 Stofftransport

Die im untersuchten Enthalpieübertrager verwendete Membran besteht aus einer dichten Grundschicht und einer porösen Stützschicht. Der Stofftransport lässt sich analog zur Elektrotechnik als eine Kette von in Reihe geschalteten Prozessen darstellen. Eine Übersicht über die in Reihe geschalteten Prozesse gibt Abbildung??.

Abbildung 2.1: Transportprozesse



Im ersten Schritt diffundiert der Wasserdampf durch den Luftstrom der Feedseite. Dies geschieht auf Grund eines Konzentrationsgradienten. Der Konzentrationsgradient entsteht durch das Ableiten des Wassermassenstroms durch die Membran.

In einem zweiten Schritt absorbiert die Membranoberfläche den Wasserdampf.

Im dritten Schritt folgt die Diffusion durch die dichte Grundsicht der Membran.

Im vierten Schritt desorbiert das Wasser an der sweepseitigen Oberfläche der Membran in die Luft.

In einem fünften Schritt wird der Wasserdampf durch die poröse Membran transportiert und verteilt sich in einem sechsten Schritt im Sweepstrom. Diese Diffusionsprozesse durch die Poren und den Luftstrom werden durch Konzentrationsgradienten verursacht.

Wie oben beschrieben führt die Betrachtung der 6 Prozessschritte als Reihenschaltung zu einer zutreffenden Beschreibung des Stofftransportes. Dies geschieht analog zur Elektrotechnik. Entsprechend ergibt sich der Gesamtwiderstand W_{ges} der Membran

$$W_{ges} = W_d + W_p \quad (2.1)$$

aus einer Addition der Einzelwiderstände von dichter Membran W_d und poröser Membran W_p .

Im Fall von parallel geschalteten Widerständen, zum Beispiel beim Auftreten von Poren in der dichten Membran, kann der Gesamtwiderstand analog zu

$$\frac{1}{W_{ges}} = \frac{1}{W_d} + \frac{1}{W_p} \quad (2.2)$$

gebildet werden. Beispiele hierfür sind das Auftreten von Poren in einer dichten Membran oder allgemein das parallele Stattfinden von konvektiven und diffusiven Stofftransportprozessen.

Sorption an Membranoberfläche

Die Triebkraft des Sorptionsprozesses ist eine Differenz im chemischen Potential. Meist werden hydrophile Membranenmaterialien für die dichte Membran eingesetzt. Daher entsteht an der Feed-Seite eine höherer Potentialdifferenz. Neben der Affinität des Membranmaterials ist die maximale Aufnahmekapazität der Membran ausschlaggebend für die Gleichgewichtskonzentration des Wassers in der Membranoberfläche. Dieses Lösungs-Gleichgewichtsmodell ist insbesondere von Lösungen anderer Aggregatzustände bekannt, z.B. von Salzlösungen oder Wasser-Luft-Lösungen. Die Beschreibung des Sorptionsprozesses mit physikalischen Modellen ist schwierig. Daher hat sich für die Beschreibung des Sorptionsprozesses ein halbempirisches Modell durchgesetzt, das sich in den

meisten Veröffentlichungen wiederfindet, z.B. in [?](#) oder [?](#). Demnach stellt sich in der Membranoberfläche eine Feuchtebeladung Θ von

$$\Theta = \frac{\omega_{max}}{1 - c + \frac{c}{\Phi}} \quad (2.3)$$

ein. Wobei ω_{max} die maximal mögliche Feuchte im Membranmaterial angibt, c eine Materialkonstante darstellt, die den Einfluss der Wasseraffinität der Membran wiederspiegelt, und Φ die Luftfeuchte im Luftstrom ist.

Diffusion durch dichte Membran

Die Diffusion durch die dichte Membran ist im vorliegenden Fall der einflussreichste Prozessschritt auf die Transportgeschwindigkeit. Bei diesem Schritt ist der Widerstand am größten. Die Triebkraft ist hier - wie für alle Diffusionsprozesse - das chemische Potential.

Unter der Annahme einer homogenen dichten Membran und konstanter thermodynamischer Randbedingungen (Druck und Temperatur) in der Membran ergibt sich eine lineare Konzentrationsverteilung über die Z-Achse der Membran. In der Literatur wird der Zusammenhang für den örtlichen Gradienten des chemischen Potentials und der übertragenen Stoffmenge ebenfalls als linear angenommen.(s.[?](#)) Entsprechend ist für den Stoffmengentransport aus physikalischen Membranmodellen die Gleichung

$$\dot{n}'' = -c_{wM} * b_{wM} * \frac{d\mu_{wM}}{dz} \quad (2.4)$$

bekannt, wobei \dot{n}'' der Stoffmengenstrom des Wassers über die Membran ist und b_{wM} die Beweglichkeit der diffundierenden Moleküle angibt. [?](#) Für den Diffusionsmassenstrom J_w ergibt sich ein proportionaler Zusammenhang zum Gradienten des chemischen Potentials μ

$$J_w = -L_w * \frac{d\mu_w}{dx} \quad (2.5)$$

,

wobei L_w der Proportionalitätsfaktor ist.

Das chemische Potential eines Stoffes i ist definiert als Summe aus einem druckabhängigen Potentialterm, einem Standardpotentialterm und einem konzentrationsabhängigen Potentialterm zu

$$\mu_i(T, p, c_i) = \mu_i^\circ(T, p^\circ) + R * T * \ln(a_i(T, p^\circ, c_i)) + \nu_i * (p - p^\circ) \quad (2.6)$$

,

wobei P° der Standarddruck ist, R die ideale Gaskonstante¹, a_i die Aktivität des Stoffes i und v_i das Molvolumen des Stoffes i .

Der Druckterm

$$v_i * (p - p^\circ) = 0 \quad (2.7)$$

entfällt unter der Voraussetzung einer idealen Gasmischung.

Der Standardpotentialterm $\mu_i^\circ(T, p^\circ)$ entfällt unter der Annahme von Isothermie entlang der z-Achse über die Membran. Da die dichte Membran sehr dünn ist, ist diese Annahme gerechtfertigt.

Der konzentrationsabhängige Potentialterm hängt im Wesentlichen von der Aktivität der diffundierenden Komponente ab. Die Aktivität ist für Lösungen als

$$a_i = \gamma_i * c_i \quad (2.8)$$

definiert, wobei γ_i der Aktivitätskoeffizient der Komponente i ist. Der Aktivitätskoeffizient gibt das Verhältnis aus aktivem und realem Stoffmengenanteil an. Er nähert sich für kleine Konzentrationen dem Wert Eins. Da eine dichte Membran betrachtet wird, ist die Annahme sinnvoll. Die oben beschriebenen Annahmen wurden auch von Zhang und Niu getroffen und mit experimentellen Ergebnissen validiert?

Aus den Annahmen folgt, dass der konzentrationsabhängige Potentialterm sich zu

$$RT * \ln(a_i(T, p^\circ, c_i)) = RT * \ln(c_i) \quad (2.9)$$

vereinfacht.

Unter den getroffenen Annahmen ergibt sich für den Stoffmengentransport von Wasser durch die Membran die Gleichung

$$J_w = \frac{-L_w * RT}{c_w} * \frac{dc_w}{dx} \quad (2.10)$$

Daher lässt sich unter der Voraussetzung einer linearen Verteilung von c_w über die z-Richtung der Membran ein linearer Zusammenhang des Stoffmengentransports von der Konzentrationsdifferenz mit einem Diffusionskoeffizienten D_w beschreiben. So folgt die Gleichung:

$$J_w = D_w * \frac{c_{wfm} - c_{wsm}}{\delta} \quad (2.11)$$

¹Gaskonstante = 8.314 J/mol/K

,

wobei c_{wfm} und c_{wsm} die Stoffmengenkonzentrationen in der feedseitigen beziehungsweise in der sweepseitigen Membranoberfläche darstellen.

Diffusion durch poröse Membran

Der Stofftransport durch die poröse Membran setzt sich aus einem Diffusionsprozess und einem Konvektionsprozess zusammen. Eine Konvektion in x- oder y-Richtung findet auf Grund der Porenrausrichtung nicht statt. Die Konvektion in z-Richtung entsteht durch den Permeatstrom. Die Diffusion ergibt sich auf Grund des Konzentrationsgradienten.

Stofftransport im Luftstrom

Bei der Beschreibung des Transports der Wassermoleküle durch die Gasphase führt die Annahme einer laminaren Luftströmung in x-Richtung zu einer deutlichen Vereinfachung des Modells. Im Fall laminarer Strömung kommt es nicht zum konvektiven Stoffaustausch in z-Richtung. Der Transport der Wassermoleküle in z-Richtung lässt sich unter dieser Annahme mit Hilfe von Diffusionsmodellen beschreiben. Die Betrachtung turbulenter Stofftransportprozesse ist in der Regel mit aufwendigen Strömungssimulationen verbunden. Eine Beschränkung auf laminare Effekte kann somit den Rechenaufwand bei Simulationen erheblich reduzieren.

Da die Turbulenz stark von der Geometrie des Strömungskanals und der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, ist diese Annahme nicht uneingeschränkt gültig. Insbesondere Spacermaterialien werden bewusst dazu eingesetzt, die Turbulenz in den Strömungskanälen zu erhöhen. Eine erhöhte Turbulenz führt zu einer Abnahme der Konzentrationsüberhöhung an den Membranoberflächen und wirkt sich positiv auf die Sorptionsgeschwindigkeit an der Membranoberfläche aus.

Konzentrationsüberhöhungen entstehen durch einen konvektiven Fluss. Der Permeatfluss durch die Membran zieht auf Grund der Kontinuitätsgleichungen einen konvektiven Massenstrom in z-Richtung nach sich. Da die Membran selektiv ist, diffundieren nur einige Stoffe, in diesem Fall die Wassermoleküle durch die Membran. Entsprechend nimmt die Konzentration der anderen Stoffe an der Membranoberfläche zu. Der Konzentrationsgradient des Wassers über die Membran ist daher geringer und somit auch die Triebkraft des Stofftransports. Die Auswirkungen der Konzentrationspolarisation sind aber im hier betrachteten Fall gering, da der Permeatstrom im Vergleich zum Gesamtmassenstrom gering ist.

2.1.2 Zusammenfassend

3 Teil3

3.1 Prüfstandsaufbau

Der Prüfstand besteht aus zwei Air Handling Units und einer Prüfbox, in der der Enthalpieübertrager installiert ist. Die Anordnung der Komponenten ist in ?? dargestellt.

Die Air Handling Unit 2 ist über einen DN 150 PVC-Schlauch mit der Prüfbox verbunden. So ist der Außenluftstrom zum Enthalpieübertrager übertragbar. Die Air Handling Unit 1 ist mit zwei PVC-Schläuchen mit der Prüfbox verbunden. So ist der Zuluftstrom vom Enthalpieübertrager zur Air Handling Unit 1 und der Abluftstrom von der Air Handling Unit 1 zum Enthalpieübertrager übertragbar. Ein vierter PVC-Schlauch führt den Fortluftstrom vom Enthalpieübertrager weg.

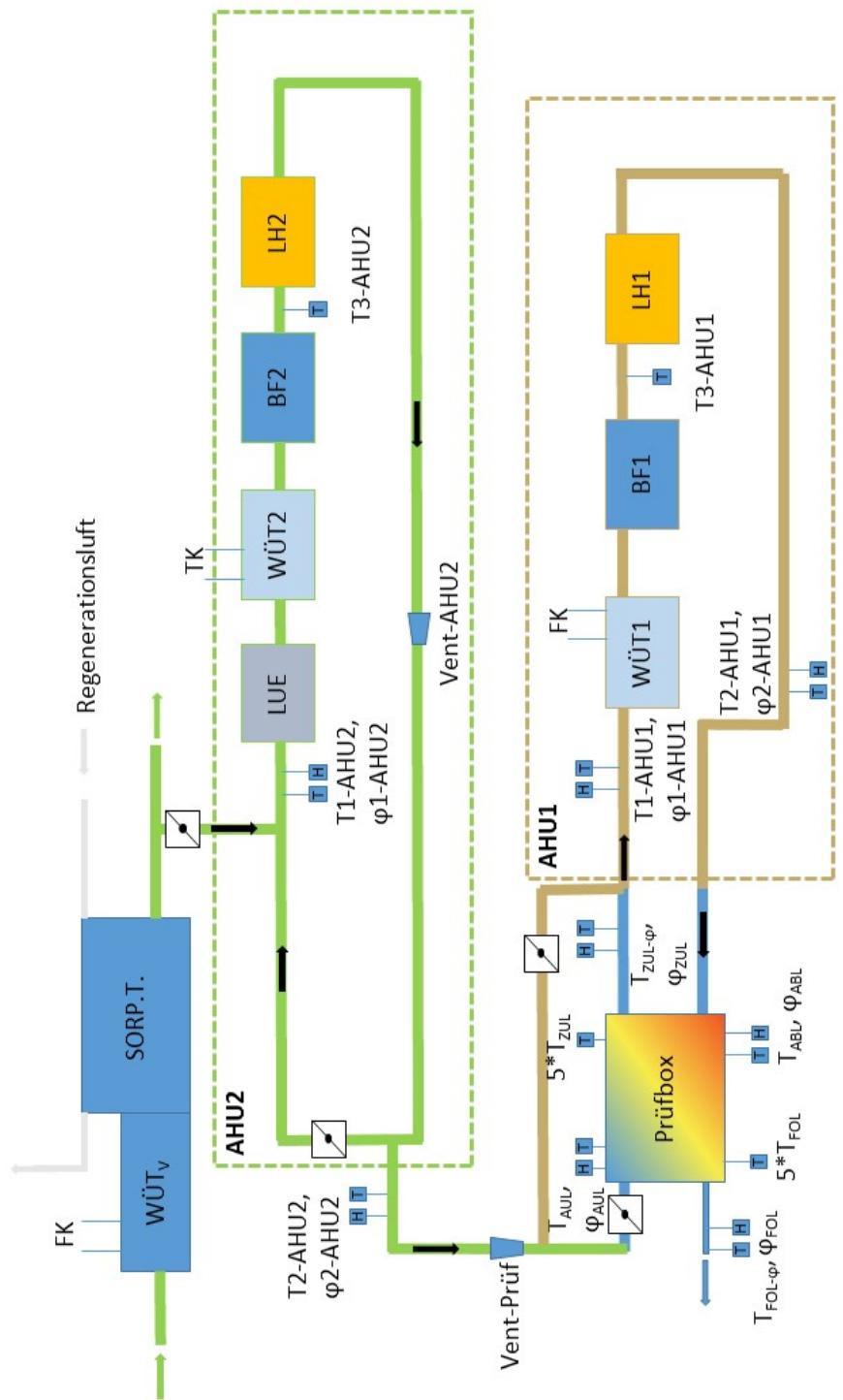


Abbildung 3.1: Technische Übersicht des Prüfstandes

3.1.1 Air Handling Units

Air Handling Unit 2

Die Air Handling Unit 2 simuliert die Umgebungsluft. Dazu weist sie einen Sorptionstrockner (*SORP.T.*) mit einer Vorkühleinheit (*WÜT_V*) und einem Ventilator auf, einen Lüfter (*LUE*), einen 22 kW Wärmeübertrager (*WÜT2*) zur Kühlung, einen elektrischen 6 kW Luftheritzer (*LH2*), sowie einen Dampfbefeuchter (*BF2*).

Um konstante Bedingungen für den Außenluftstrom zu gewährleisten ist in der Air Handling Unit 2 ein Luftstrom im Kreis förderbar. Hierbei können bis zu 4500 m³/h gefördert werden. Der Volumenstrom wird über ein Venturirohr (*Vent – AHU2*) gemessen. Ein weiteres Venturirohr (*Vent – Prüf*) misst den Außenluftstrom der zur Prüfbox fließt. Der Außenluftstrom beträgt maximal 450 m³/h. Die Regelung der Volumenströme erfolgt jeweils über Absperrklappen, die kontinuierlich verstellbar sind.

Für die Temperaturregelung ist jeweils ein Temperatursensor Stromabwärts der Luftzufuhr (*T1 – AHU2*) und zu Beginn des Außenluftstroms verbaut. Außerdem befindet sich ein dritter Temperatursensor (*T3 – AHU2*) vor dem Luftheritzer. Dies gewährleistet eine schnelle Reaktion der Regelung.

Zur Regelung des Dampfbefeuchters ist ein Feuchtesensor mit Temperaturfühler ($\varphi 1$ -AHU2) in der Außenluftleitung verbaut. Der Sorptionstrockner wird manuell gesteuert. Um notwendige Leistung des Sorptionstrockners zu ermitteln befindet sich ein Feuchtesensor inklusive Temperatursensor in der Leitung des Außenluftstroms ($\varphi 2$ – AHU2).

Der Temperatursensor *T2 – AHU2* ist mit einem Temperaturwächter verbunden. Der Temperaturwächter reagiert bei 60 °C und trennt den Luftheritzer von der Stromversorgung. Der Wärmeübertrager wird auf der Primärseite von einem Solestrom (*TK*) durchflossen. Zulaufseitig weist die Sole eine Temperatur von ca. -20 °C auf. Daher ist eine Abkühlung des Außenluftstromes auf Temperaturen von bis zu -10 °C möglich.

Air Handling Unit 1

Die Air Handling Unit 1 simuliert die Abluft. Sie weist einen elektrischen 4 kW Luftheritzer (*LH1*), einen 3 kW Wärmeübertrager (*WÜT1*) zum Kühlen und eine Dampfbefeuchter (*BF1*) auf. Der Volumenstrom durch die Air Handling Unit 1 entspricht dem des Außenluftstromes.

Zur Regelung der Luftbedingungen ist jeweils am Eintritt und am Austritt der Air Handling Unit 1 ein Feuchtesensor ($\varphi 1$ – AHU1, $\varphi 2$ – AHU1) mit Temperaturfühler sowie je ein weiterer Temperatursensor (*T1 – AHU1*, *T2 – AHU2*) verbaut. Außerdem ist ein Temperatursensor (*T3 – AHU1*) vor

dem Lufterhitzer verbaut. Der Temperatursensor $T3 - AHU1$ ermöglicht eine schnelle Reaktionszeit der Regelung. Der Temperatursensor $T2 - AHU1$ ist außerdem mit einem Temperaturwächter verbunden, der bei 40°C auslöst. Der Temperaturwächter nimmt beim Auslösen den Lufterhitzer von der Stromversorgung.

Der Wärmeübertrager der Air Handling Unit 1 ist primärseitig an die Fernkälte (*FK*) angeschlossen. Der Wasserstrom der Fernkälte besitzt eine Zulauftemperatur von ca. 8 bis 9°C . Entsprechend ist es nicht möglich sehr kalte Temperaturen im Abluftstrom zu simulieren. Die minimale Temperatur der Abluft hängt von der Eintrittstemperatur der Luft und Leistung des Dampfbefeuchters in die Air Handling Unit 1 ab. Bei Temperaturen unter 10 bis 15°C der Ablufttemperatur nimmt außerdem die Regeldauer stark zu. Die Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager ist in diesem Fall so gering, dass nur eine geringe Leistung übertragen wird. Aufgrund des Wärmeübertragers tritt die Zuluft auch bei einem kalten Außenluftstrom zunächst mit erhöhter Temperatur in die Air Handling Unit 1 ein. Daher ist es während der Abkühlphase sinnvoll den Wärmeübertrager zunächst mittels eines Bypasses zu überbrücken.

Alle in den Air Handling Units 1 und 2 verbauten Sensoren dienen der Regelung und Steuerung der Luftzustände. Alle zur Regelung verbauten Temperatursensoren entsprechen der Genauigkeitsklasse 1/3 Klasse B. Alle zur Regelung verbauten Feuchte-Sensoren weisen eine Genauigkeit von $\pm 1\%$ relativer Feuchte auf.

3.1.2 Prüfbox

Die Prüfbox dient als Halterung des Enthalpieübertragers und ermöglicht die Anströmung der Einlässe beziehungsweise die Abströmung an den Auslässen des Enthalpieübertragers. Abbildung ?? zeigt die Prüfbox im montierten Zustand am Prüfstand. Von außen ist sie mit 22 mm Amaflex gedämmt, um die Temperaturverluste zu minimieren.

Um die einen hohe Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten und die Übertragungsflächen im Enthalpieübertrager gleichmäßig zu nutzen, ist eine gleichmäßige Anströmung der Einlassflächen des Enthalpieübertragers notwendig. Die Norm ... beschreibt Rahmenbedingungen unter denen Experimente mit Luftströmungen reproduzierbar durchgeführt werden können. Die Norm beschreibt für einen Rohrdurchmesser von Eine Länge von ... für die Einströmstrecke.

Diese Bedingungen sind im Rahmen dieser Masterarbeit nicht Umsetzbar. Daher wurde eine Prüfbox konstruiert, die bei einer kurzen Einströmstrecke eine möglichst gleichmäßige Anströmung gewährleistet.

Abbildung ?? zeigt die Einlassseite des Feedstroms. Die Prüfbox ist auf der Einlassseite der Luftströme jeweils mit einem Lochblech versehen. Das Lochblech ist diagonal vor der Anströmfläche

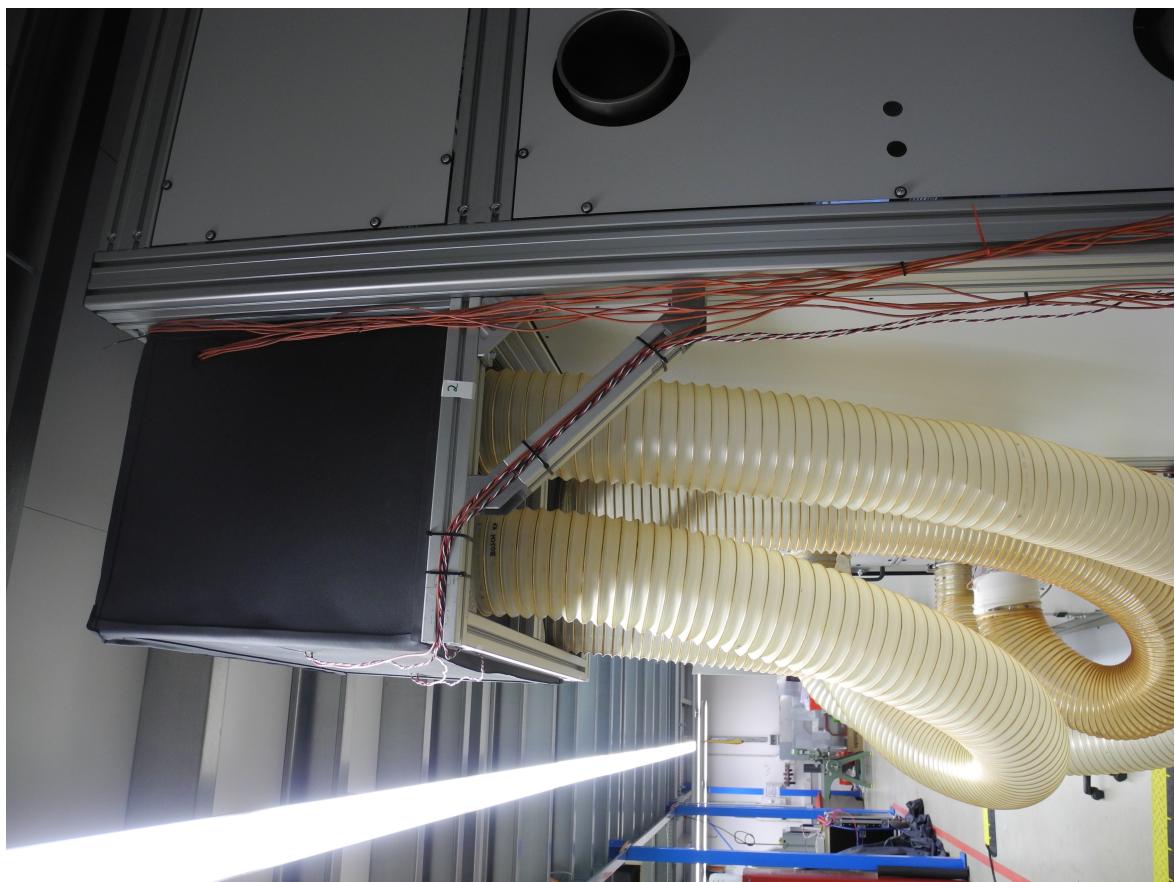


Abbildung 3.2: Außenansicht montierte Prüfbox

des Enthalpieübertragers angeordnet. Das Lochblech erzeugt einen Staudruck. Dies führt zu einer gleichmäßigeren Anströmung des Enthalpieübertragers. Der Luftzustrom in die Prüfbox verläuft orthogonal zur Anströmfläche des Enthalpieübertragers. Die diagonale Positionierung des Lochbleches gleicht den Druckverlust der Strömung entlang der Anströmfläche aus. So ermöglicht die Prüfbox eine gleichmäßige Anströmung des Enthalpieübertragers bei einer geringen Baulänge. Die Homogenität der Luftströmung konnte im Rahmen dieser Masterarbeit nicht überprüft werden.



Abbildung 3.3: Prüfbox Einlassseite Feedstrom

3.1.3 Messsensoren

Im Gegensatz zu den in ?? beschriebenen Sensoren, werden die Sensoren in Prüfbox sowie die Sensoren zwischen Prüfbox und den Air Handling Units als Messdaten für die Auswertung der Versuche genutzt. Die Lage der Sensoren ist so gewählt, dass sie möglichst genau den Zustand der Luft beim Eintritt in den Enthalpietauscher beziehungsweise beim Austritt aus dem Enthalpietauscher wiedergeben. Außerdem soll eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Versuche gewährleistet sein.

Verteilung der Sensoren

Verteilung der Temperatursensoren Für den Feed-Strom und den Sweep-Strom sind auf der Eingangsseite jeweils ein Temperatursensor (T_{AUL} , T_{ABL}) und ein Feuchtesensor (PHI_{AUL} , PHI_{ABL}) in die Prüfbox verbaut. Der Temperatursensor wird mittels einer Messinghülse in Position gehalten. Feuchtesensor ist ebenfalls von außen an der Messinghülse befestigt. Der Abstand der beiden Sensoren beträgt so nur wenige Millimeter. Durch die kurze Distanz wird eine genaue Bestimmung des absoluten Feuchtegehalts der Luft (x_{AUL} , x_{ABL}) ermöglicht.

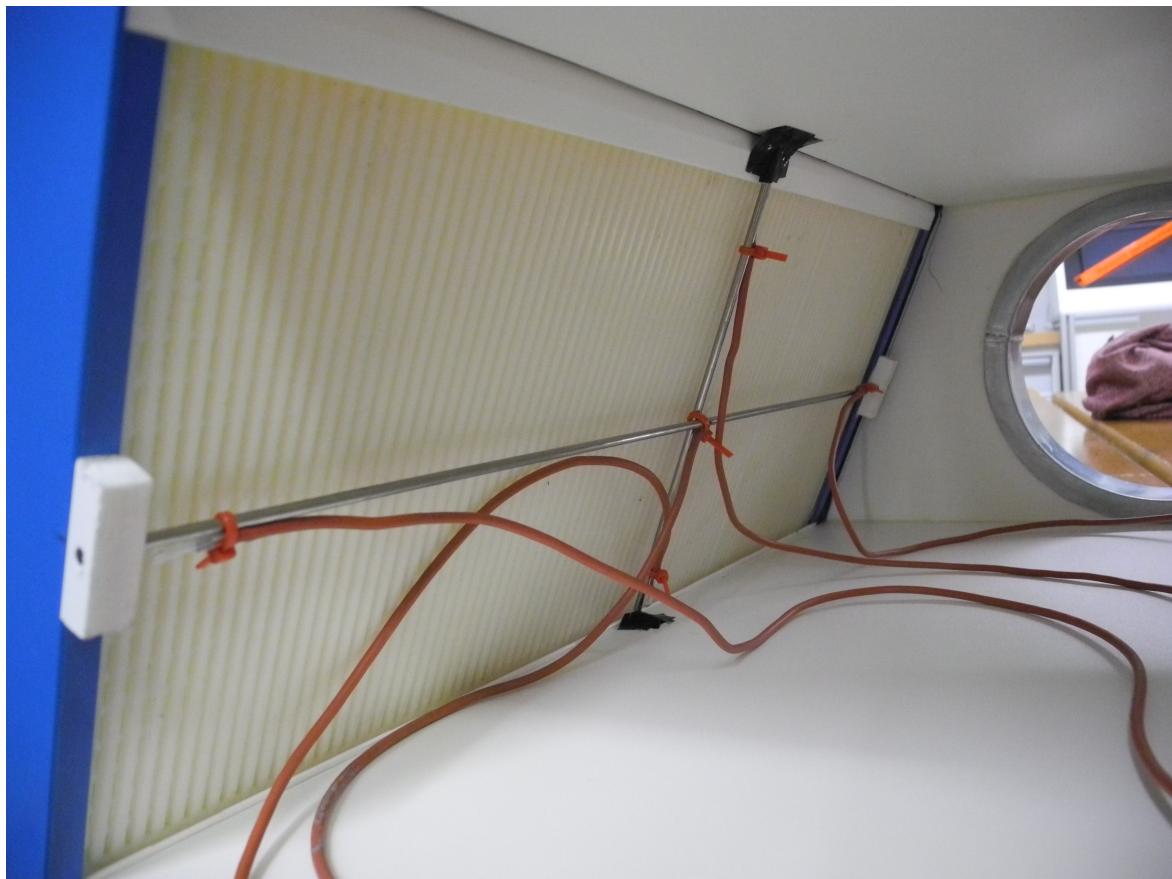


Abbildung 3.4: Prüfbox - Auslasseite Feedstrom

Abbildung ?? zeigt die Abströmseite des Feedstroms. Die Abströmseite des Sweepstrom ist identisch zu der des Feedstroms. Auf der Abströmseite beider Ströme sind an den Abströmflächen des Enthalpieübertragers jeweils fünf Temperatursensoren (T_{ZUL-L} , $T_{ZUL-Mitte}$, T_{ZUL-R} , T_{ZUL-O} , T_{ZUL-U} , T_{FOL-L} , $T_{FOL-Mitte}$, T_{FOL-R} , T_{FOL-O} , T_{FOL-U}) angebracht. Diese sind jeweils Kreuzförmig angebracht.

Durch die Kreuzstromgeometrie des Enthalpieübertragers entsteht ein Temperatur- und ein Feuch-

tegradient entlang der beta-Achse der Abströmfläche (s.Kap...). Auch eine inhomogene Strömung durch eine ungleichmäßige Anströmung oder Durchströmung des Enthalpieübertragers führt zu Temperatur- und Feuchtegradienten über der Abströmfläche. Dies ist in Kapitel ?? beschrieben. Die fünf Temperaturen jeder Seite werden zur Auswertung zu den Temperaturen T_{ZUL} und T_{FOL} gemittelt. Das vorgehen zur Mittelung ist in Kapitel ... beschrieben.

Die Norm DIN... definiert die Messung der Temperatur in einem Luftstrom ... Zur Messung der Temperatur wird ein Messpunktennetz aus ... mal ... Sensoren gefordert. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Mit der gewählten Anordnung der Sensoren sind 3 Messpunkte je Koordinaten Richtung und Fläche möglich. Dies ermöglicht eine Ermittlung der Hauptwirkungen 2. Grades der beschriebenen Einflüsse. Eine Ermittelung der Wechselwirkungen ist auf diese Weise nicht möglich.

An den Abströmseiten werden die Feuchtesensoren ($\varphi_{ZUL}, \varphi_{FOL}$) nicht in der Prüfbox positioniert. Es steht nur ein Sensor pro Seite zur Verfügung. Eine Messung kurz hinter der Abströmfläche des Enthalpieübertragers ist nicht sinnvoll. Dort weist der Luftstrom eine hohe Inhomogenität auf. Eine Messung an dieser Stelle kann zur Messung eines lokalen Feuchtwerts führen, der stark von dem Durchschnittswert im entsprechenden Luftstrom abweicht. Daher werden die Feuchtwerte erst nach einer Durchmischungsstrecke gemessen. An dieser Stelle kann von einem thermodynamisch homogenen Strom ausgegangen werden. Zur Ermittlung der korrekten absoluten Feuchte (x_{ZUL}, x_{FOL}) wird an dieser Stelle die Temperatur ($T_{ZUL-\varphi}, T_{FOL-\varphi}$) erneut gemessen.

Über die Durchmischungsstrecke ist absolute Feuchte konstant. Daher lässt sich mit den Temperaturen T_{ZUL} und T_{FOL} in der Prüfbox die relative Feuchte direkt nach dem Enthalpieübertrager errechnen. Für alle beschriebenen Temperaturmessungen sind PT 100 Messsensoren der Genauigkeit 1/10 Klasse B nach DIN EN 60751 verbaut. Für alle beschriebenen Feuchtemessungen sind Honeywell HIH-Feuchtesensoren verbaut. Sie besitzen eine Genauigkeit von $\pm 3,5\%$ relativer Feuchte.

3.2 Berechnung der Feuchte Werte

3.2.1 Berechnung der Absoluten Feuchte

Die Berechnung der absoluten Feuchte erfolgt nach der Arden Buck Gleichung?. Danach ergibt sich die absolute Feuchte in g/kg für Temperaturen über 0 °C zu

$$x = \frac{18,015 * f1_{wDP}}{28,963 * (P - f1_{wDP})} \quad (3.1)$$

wobei $f1_{wDP}$ der Dampfdruck ist und P der Absolutdruck in hPa. Der Dampfdruck berechnet sich zu

$$f1_{wDP} = \varphi * f1_{wT} / 100 \quad (3.2)$$

wobei $f1_{wT}$ dem Sattdampfdruck bei der Temperatur T entspricht und φ die relative Feuchte angibt. $f1_{wT}$ berechnet sich nach Buck empirisch zu

$$f1_{wT} = EF_w * a_w * \exp\left(\left(b_w - \frac{T}{d_w}\right) * \frac{T}{T + c_w}\right) \quad (3.3)$$

wobei a_w^1 , b_w^2 , c_w^3 und d_w^4 empirische Werte für Werte sind, die die Sättigungsdampfkurve flüssigem Wasser beschreiben. EF_w ist ein Fehlerkorrekturfaktor. Er korrigiert die veränderten Stoffeigenschaften von feuchter Luft gegenüber einem idealen Gas. Der Zusammenhang

$$EF_w = 1 + 10^{-4} * (7,2 + P * (0,0320 + 5,9 * 10^{-6} * T^2)) \quad (3.4)$$

für den Fehlerkorrekturfaktor ist ebenfalls empirisch ermittelt.

Für Temperaturen unterhalb von 0 °C ergeben sich auf Grund des Phasenübergangs von Wasser andere Stoffeigenschaften und somit andere empirische Zusammenhänge.

Für die absolute Feuchte bei Temperaturen unter 0 °C bleibt der Zusammenhang entsprechend

$$x = \frac{18,015 * f1_{iDP}}{28,963 * (P - f1_{iDP})} \quad (3.5)$$

wobei $f1_{iDP}$ den Dampfdruck bei Eis angibt. Der Dampfdruck von Eis ermittelt sich ebenfalls analog zu flüssigem Wasser zu

$$f1_{iDP} = \varphi * f1_{iT} / 100 \quad (3.6)$$

wobei sich der Sättigungsdampfdruck $f1_{iT}$ im Vergleich zu flüssigem Wasser ändert. Er ergibt sich für Eis zu

$$f1_{iT} = EF_i * a_i * \exp\left(\left(b_i - \frac{T}{d_i}\right) * \frac{T}{T + c_i}\right) \quad (3.7)$$

¹ $a_w = 6,1121$

² $b_w = 18,678$

³ $c_w = 257,14$

⁴ $d_w = 234,5$

mit den Faktoren a_i^5 , b_i^6 , c_i^7 und d_i^8 . Die Regressionsfaktoren des Korrekturfaktors EF_i ändern sich ebenfalls, sodass sich der Zusammenhang

$$EF_w = 1 + 10^{-4} * (2,2 + P * (0,0383 + 6,4 * 10^{-6} * T^2)) \quad (3.8)$$

ergibt. Die Gleichungen wurden aus den Zusammenhängen von φ in Anlehnung an φ entnommen. Sie weisen einen relativen Fehler von unter 0,5 % auf.

3.2.2 Berechnung der relativen Feuchte

Die Rückrechnung zur relativen Feuchte erfolgt über den gleichen Zusammenhang. So ergibt sich die relative Feuchte zu

$$\varphi = \frac{f1_{wDP} * 100}{f1_{wT}} \quad (3.9)$$

für flüssiges Wasser beziehungsweise zu

$$\varphi = \frac{f1_{iDP} * 100}{f1_{iT}} \quad (3.10)$$

für Eis. Der Dampfdruck lässt sich aus der absoluten Feuchte anhand der Gleichung

$$f1_{i,wDP} = \frac{P * x}{\frac{18,015}{28,963} + x} \quad (3.11)$$

für flüssiges und festes Wasser ermitteln lässt.

Die Temperatur der konditionierten Luft lässt sich bis auf eine Genauigkeit von ... einregeln. Die Feuchte der konditionierten Luft lässt sich bis auf eine Genauigkeit von... einregeln. Eine Aufzeichnung der gemessenen Temperaturen für die Sollwerte ... findet sich in Abbildung.

⁵ $a_i = 6,1115$

⁶ $b_i = 23,036$

⁷ $c_i = 279,82$

⁸ $d_i = 333,7$

4 Teil4

4.1 Enthalpieübertrager

Der in dieser Untersuchung verwendete Enthalpieübertrager ist der ein Kreuzstromübertrager. Das heißt der Feedstrom und der Sweepstrom werden über Kreuz aneinander vorbei geführt. Ein klassischer Kreuzstromübertrager weißt einen quadratischen Querschnitt auf. Die Luftströme kreuzen sich in einem solche Übertrager daher in einem 90° Winkel. Im Gegensatz dazu weißt der hier verwendete Enthalpieübertrager einen sechseckigen Querschnitt auf, wie in Abbildung ?? dargestellt. Diese Geometrie führt dazu, dass die Luftströme in einem steileren Winkel aneinander vorbei strömen. Daher ist anzunehmen, dass beim vorliegenden Enthalpieübertrager das Übertragungsverhalten leicht von dem eines reinen Kreuzstromübertragers abweichen und dass dieser teilweise Eigenschaften eines Gegenstromübertragers aufweist.

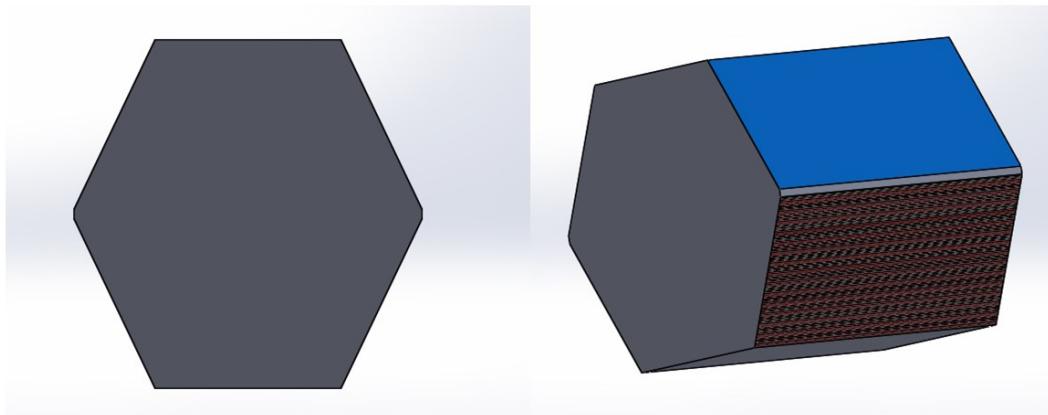


Abbildung 4.1: Geometrie Enthalpieübertrager

Der Enthalpieübertrager hat eine Länge von 450 mm, eine Breite von 365 mm und ein Höhe von 365 mm. Die Anström- und Abströmflächen besitzen jeweils die Abmaße 450 x 196 mm. Der Abstand

von der Anströmfläche einer Luftströmung zu ihrer Abströmfläche beträgt 333 mm. Die Übertragungsfläche jeder einzelnen Membran entspricht in etwa dem in Abbildung ?? dargestellten sechseckigen Querschnitt. Sie weist jeweils eine Fläche von ca. 1030 cm² auf.

Die Membranen des verwendeten Enthalpieübertragers bestehen aus Polyethylen und Polyether-Copolymer. Das Gehäuse und die Spacer aus Polystyrol. Es sind 185 Membranen mit einer Dicke von 0,11 mm und einem Abstand von 2,25 mm verbaut. Folglich weist der Enthalpieübertrager je 93 Strömungskanäle für den Sweepstrom und für den Feedstrom auf.

5 Teil5

5.1 Temperaturmessung an den Abströmflächen

Korrektur der Austrittstemperatur Das Temperaturprofil an den Luftaustrittsflächen des Enthalpieübertragers ist nicht vollständig homogen. Die Inhomogenität im Temperaturprofil wird im Wesentlichen durch drei Einflüsse hervorgerufen. Diese drei Einflüsse sind: 1. eine ungleichmäßige Anströmung am Eintritt in den Enthalpieübertrager, 2. eine Aufweitung des Strömungskanals im Vergleich zum Eintritts- beziehungsweise Austrittsquerschnitt und 3. eine zumindest teilweise in Kreuzform geführte Strömungsgeometrie.

Das Temperaturprofil wird außerdem durch Wärmeverluste an die Umgebung beeinflusst. Diese werden im Folgenden aber als gering eingeschätzt und bei der Berechnung vernachlässigt.

Die ungleichmäßige Anströmung am Eintritt des Enthalpieübertragers und die Aufweitung der Strömungskanäle führt zu unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Eine hohe Strömungsgeschwindigkeit senkt die Verweilzeit der Luft im Enthalpieübertrager. Dadurch sinkt die Übertragungsrate der Wärme. Dies zeigt auch eine Messung mit zwei Unterschiedlichen Volumenströmen.

Einfluss der Stromführung auf das Temperaturprofil Der Einfluss der Stromführungsgeometrie ist dadurch bestimmt, dass sich Effekte die aus Kreuzstromübertragern bekannt sind mit Effekten die aus Gegenstromübertragern bekannt sind überlagern.

Bei einem reinen adiabten Gegenstromübertrager ist die Temperatur über die α - und β - Achse konstant. Die Temperatur ändert sich entlang der Strömungsachse. Abbildung ... zeigt eine vereinfachte Darstellung des Temperaturverlaufes in einem Gegenstromübertrager entlang der Strömungsrichtung. Die Temperaturverläufe wurden vereinfacht linear angenommen. Der Wärmekapazitätskoeffizient ist auf der Feedseite und der Sweepseite gleich groß. Daher besitzen beide Geraden die gleiche Steigung.

Da sich die kälteste Stelle des Frischluftstromes (Außenluft) mit der kältesten Stelle des Sweepstromes (Fortluft) trifft und die heißestes Stelle des Frischluftstromes mit der heißesten Stelle des Sweepstromes ist die Temperaturdifferenz zwischen beiden Strömen konstant. So kann das Potential des Sweepstromes optimal ausgenutzt werden.

Für einen reinen Kreuzstromübertrager gilt dies nicht. Wie Abbildung zeigt, treffen in einer Ecke des Kreuzstromübertragers die heißeste und die kälteste Stelle der Luftströme aufeinander. So kann

der Volumenstrom der an einer Seite des Kreuzstromübertragers nicht das volle Potenzial der Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Abluft nutzen. Unter den gleichen Bedingungen wie der Betrachtung des reinen Gleichstromübertragers, entsteht das in der Abbildung ... dargestellte Temperaturprofil.

Dieser Effekt tritt in abgeschwächter Form auch bei dem vorliegenden Enthapieübertrager auf und nimmt so Einfluss auf das entstehende Temperaturprofil in α - Richtung.

Um die Einflüsse der anderen drei Faktoren abschätzen zu können, wurde ein Kreuz aus Temperaturmesssensoren (PT100) direkt an den Austrittsflächen des Übertragers angebracht, wie in ?? beschrieben

Anordnung

In Abbildung ... ist das mittlere Temperaturprofil aus den Messungen 1-23 aus Tabelle— über α und β dargestellt. Dabei stellen α und β die Koordinaten eines orthogonalen Koordinatensystems dar, das parallel zur jeweiligen Abströmfläche liegt. Sowohl für die Fortluft als auch für die Abluft ergibt sich eine Funktion zweiten oder höheren Grades.

Literaturverzeichnis

[Streblow 2010] STREBLOW, Dr.-Ing. R.: *Thermal Sensation and ComfortModel for Inhomogeneous Indoor Environments*, RWTH Aachen University, Diss., 2010

Anhang

A Wichtiger Anhang 1

Weit hinten, hinter den Wortbergen, fern der Länder Vokalien und Konsonantien leben die Blindtexte. Abgeschieden wohnen Sie in Buchstabhausen an der Küste des Semantik, eines großen Sprachozeans. Ein kleines Bächlein namens Duden fließt durch ihren Ort und versorgt sie mit den nötigen Regelalien. Es ist ein paradiesmatisches Land, in dem einem gebratene Satzteile in den Mund fliegen. Nicht einmal von der allmächtigen Interpunktions werden die Blindtexte beherrscht – ein geradezu unorthographisches Leben. Eines Tages aber beschloß eine kleine Zeile Blindtext, ihr Name war Lorem Ipsum, hinaus zu gehen in die weite Grammatik. Der große Oxmox riet ihr davon ab, da es dort wimmele von bösen Kommata, wilden Fragezeichen und hinterhältigen Semikoli, doch das Blindtextchen ließ sich nicht beirren.

A.1 Die Versalien

Es packte seine sieben Versalien, schob sich sein Initial in den Gürtel und machte sich auf den Weg. Als es die ersten Hügel des Kursivgebirges erklimmen hatte, warf es einen letzten Blick zurück auf die Skyline seiner Heimatstadt Buchstabhausen, die Headline von Alphabetdorf und die Subline seiner eigenen Straße, der Zeilengasse. Wehmütig lief ihm eine rhetorische Frage über die Wange, dann setzte es seinen Weg fort. Unterwegs traf es eine Copy. Die Copy warnte das Blindtextchen, da, wo sie herkäme wäre sie zigmals umgeschrieben worden und alles, was von ihrem Ursprung noch übrig wäre, sei das Wort ündünd das Blindtextchen solle umkehren und wieder in sein eigenes, sicheres Land zurückkehren. Doch alles Gutzureden konnte es nicht überzeugen und so dauerte es nicht lange, bis ihm ein paar heimtückische Werbetexter auflauerten, es mit Longe und Parole betrunken machten und es dann in ihre Agentur schleppten, wo sie es für ihre Projekte wieder und wieder mißbrauchten.

Und wenn es nicht umgeschrieben wurde, dann benutzen Sie es immernoch. Weit hinten, hinter den Wortbergen, fern der Länder Vokalien und Konsonantien leben die Blindtexte. Abgeschieden wohnen Sie in Buchstabhausen an der Küste des Semantik, eines großen Sprachozeans. Ein kleines Bächlein namens Duden fließt durch ihren Ort und versorgt sie mit den nötigen Regelalien. Es ist ein paradiesmatisches Land, in dem einem gebratene Satzteile in den Mund fliegen. Nicht einmal von der allmächtigen Interpunktions werden die Blindtexte beherrscht – ein geradezu unorthographisches Leben. Eines Tages aber beschloß eine kleine Zeile Blindtext, ihr Name war Lorem Ipsum,

hinaus zu gehen in die weite Grammatik. Der große Oxmox riet ihr davon ab, da es dort wimmele von bösen Kommata, wilden Fragezeichen und hinterhältigen Semikoli, doch das Blindtextchen ließ sich nicht beirren. Es packte seine sieben Versalien, schob sich sein Initial in den Gürtel und machte sich auf den Weg. Als es die ersten Hügel des Kursivgebirges erklimmen hatte, warf es einen letzten Blick zurück auf die Skyline seiner Heimatstadt Buchstabhausen, die Headline von Alphabetdorf und die Subline seiner eigenen Straße, der Zeilengasse. Wehmütig lief ihm eine rhetorische Frage über die Wange, dann setzte es seinen Weg fort. Unterwegs traf es eine Copy. Die Copy warnte das Blindtextchen, da, wo sie herkäme wäre sie zigmals umgeschrieben worden und alles, was von ihrem Ursprung noch übrig wäre, sei das Wort ünd"

B Ähnlich wichtiger Anhang

Es gibt im Moment in diese Mannschaft, oh, einige Spieler vergessen ihnen Profi was sie sind. Ich lese nicht sehr viele Zeitungen, aber ich habe gehört viele Situationen. Erstens: wir haben nicht offensiv gespielt. Es gibt keine deutsche Mannschaft spielt offensiv und die Name offensiv wie Bayern. Letzte Spiel hatten wir in Platz drei Spalten: Elber, Jancka und dann Zickler. Wir müssen nicht vergessen Zickler. Zickler ist eine Spalten mehr, Mehmet eh mehr Basler. Ist klar diese Wörter, ist möglich verstehen, was ich hab gesagt? Danke. Offensiv, offensiv ist wie machen wir in Platz. Zweitens: ich habe erklärt mit diese zwei Spieler: nach Dortmund brauchen vielleicht Halbzeit Pause. Ich habe auch andere Mannschaften gesehen in Europa nach diese Mittwoch. Ich habe gesehen auch zwei Tage die Training. Ein Trainer ist nicht ein Idiot! Ein Trainer sei sehen was passieren in Platz. In diese Spiel es waren zwei, drei diese Spieler waren schwach wie eine Flasche leer! Haben Sie gesehen Mittwoch, welche Mannschaft hat gespielt Mittwoch? Hat gespielt Mehmet oder gespielt Basler oder hat gespielt Trapattoni? Diese Spieler beklagen mehr als sie spielen! Wissen Sie, warum die Italienmannschaften kaufen nicht diese Spieler? Weil wir haben gesehen viele Male solche Spiel! Haben

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit in der Lehrstuhlbibliothek und Datenbank aufbewahrt und für den internen Gebrauch kopiert werden darf.

Aachen, den 9. August 2016

Name hier bitte einfügen