

BA 007



# Bachelorarbeit

## Design von Bachelorarbeiten

Design of bachelor's thesis

Aachen, Januar 2050

**Dein Name**

Matrikelnummer: 000815

betreut von:

Dipl.-Phys. Max Mustermannin

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 Raume 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 aufbauen. 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 Programmieren einfach standardkonforme Webseiten. Ihr Budget wird es Ihnen auf Dauer danken. Ebenso möchte ich Ihnen dafür danken, dass Sie mich bis 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

<b>Nomenklatur</b>	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Vorwort</b>	<b>xii</b>
<b>1 Teil1</b>	<b>2</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Enthalpieübertrager . . . . .	3
1.3 Membran . . . . .	5
1.4 Stand der Technik . . . . .	7
<b>2 Teil2</b>	<b>10</b>
2.1 Modell . . . . .	10
2.1.1 Stofftransport . . . . .	10
2.1.2 Zusammenfassend . . . . .	14
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>16</b>
<b>A Wichtiger Anhang 1</b>	<b>18</b>
A.1 Die Versalien . . . . .	18
<b>B Ähnlich wichtiger Anhang</b>	<b>20</b>

Nomenklatur

# Nomenklatur

## Formelzeichen und Einheiten

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

**griechische Formelzeichen**

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$\eta_C$	Carnot-Wirkungsgrad	—
$\kappa_E$	exergetische Aufwandszahl der Wärmeerzeugung	—
$\kappa_T$	exergetische Aufwandszahl des Wärmetransfers	—
$\Phi$	thermische Leistung	W
$\rho$	Massendichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Temperaturspreizung	K
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K

**Indizes und Abkürzungen**

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
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

Fortsetzung auf der nächsten Seite



## Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
PCM	Latentwärmespeichermaterial ( <i>phase change material</i> )
PH	physikalisch
PT	potentiell
Q	auf einen Wärmestrom bezogen
R	Rücklauf
Reg	Speicherregeneration
T	Temperatur
$\Delta t$	Zeitschritt der Länge $\Delta t$
t	technisch
V	Vorlauf
V	Verlust (Exergieanalyse)
W	Wärmeträgermedium

Inhaltsverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Verschieden Ausführungsformen von Enthalpieübertragern . . . . .	3
1.2	hollow fibre . . . . .	5
1.3	Membran . . . . .	6
2.1	Membranprozesse . . . . .	15

**Tabellenverzeichnis**

1.1 Das ist eine Testtabelle . . . . . 9

## Vorwort

*Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet 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 laoreet 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.* Vorwort

Tabellenverzeichnis Tabellenverzeichnis Tabellenverzeichnis Tabellenverzeichnis

# 1 Teil1

## 1.1 Motivation

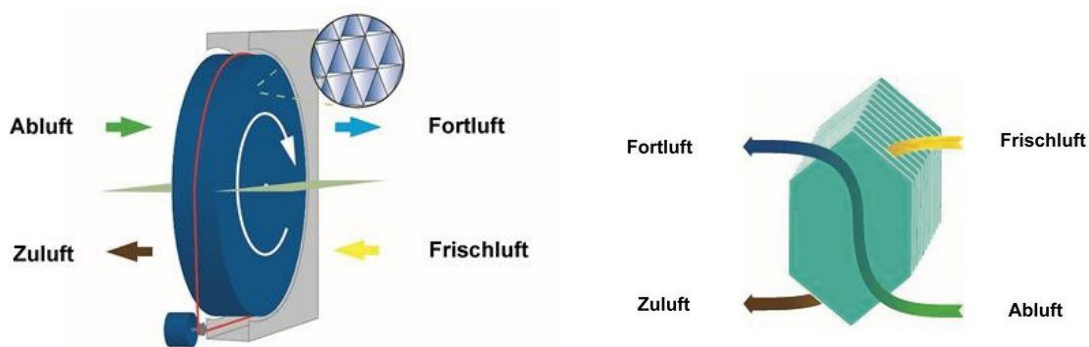
Die Bereitstellung von Wärme und elektrischer Energie beeinflusst immer stärker das Klima. Nach wie vor wird zumeist die Energie fossiler Energieträger genutzt, um den Bedarf zu decken. Um den Einfluss unseres Energiebedarfs auf das Klima zu reduzieren, wurden in den vergangenen Jahrzehnten verschiedene Versuche unternommen die Energiebereitstellung auf nachhaltige Quellen umzustellen. In diesem Zusammenhang ergibt sich das Ziel die Anreicherung von in der Erde gespeichertem 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. Wobei die Nutzbarkeit aller drei genannten Energiequellen stark von den geologischen, klimatischen und geographischen Bedingungen der jeweiligen Region abhängt und in den meisten Regionen starken Leistungsschwankungen unterliegt, sodass sich Problematiken in der Speicherung der Energie ergeben. 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 vor allem über die "Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden", kurz EnEV <sup>1</sup>, von staatlicher Seite. Ziel der EnEV ist es durch eine gute Isolierung 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 Wärmeverlust über die ausgetauschte Luft 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. Da an Wohngebäude und Bürogebäude oft hohe Anforderungen bezüglich der Luftqualität gestellt werden, 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 liefert <sup>2</sup>. In feucht warmen Klimazonen tritt oft ein gegenteiliger Effekt auf. 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 Luftbefeuchter muss hierzu die Verdampfungsenthalpie des Wassers überwunden werden, eine Beschreibung des Energieverbrauchs von klassisch zur Trocknung von Luft eingesetzten Sorptionstrocknern findet sich beispielsweise in Enthalpietauscher stellen eine Möglichkeit da, diese Energieaufwände zu reduzieren.

## 1.2 Enthalpieübertrager

Aus dem Stand der Technik sind vor allem Speicherenthalpieübertrager und membranbasierte Enthalpieübertrager bekannt. 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.



(a) Rotationsenthalpieübertrager

(b) Membranbasierter Enthalpieübertrager

**Abbildung 1.1:** Verschieden Ausführungsformen von Enthalpieübertragern

Die Verbreitetsten Speicherübertrager sind Rotationsübertrager. Rotationsübertrager weisen einen 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 im 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 im anderen Luftstrom wieder verdampft. Rotationsübertrager befinden sich bereits seit einigen Jahren kommerziell im Einsatz und wurden bereits entsprechend detailliert untersucht. Membranbasierte Enthalpieübertrager sind erst seit wenigen Jahren kommerziell im Einsatz, sodass es bisher nur wenige Untersuchungen zu ihnen existieren. Die Wärme wird dann über die Membran von einem Luftstrom über an den anderen übertragen. Analog zum übertragenen Wärmestrom wird die Feuchte übertragen, das heißt 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, wobei auch Gegenstromübertrager und "hollow fibre" Module mögliche Bauform darstellen. 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. Hollow fibre Module ermöglichen hohe Übertragungsflächen bei kleinem Bauraum und somit hohe Übertragungsraten für Wärme und Feuchte. Nachteilig ist jedoch ein sehr hoher Druckverlust in den Modulen, der bisher verhindert hat, dass diese Bauform sich in kommerziellen Anwendungen durchsetzen konnte.

Ein Vergleich zwischen Rotationsübertragern und membranbasierten Enthalpietauschern fällt je nach Untersuchung unterschiedlich aus. Grundsätzlich 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. Nachteilig ist, dass Enthalpieübertrager nicht regelbar sind. Laut ist es bei besonders feucht-warmen Tagen daher möglich, dass ein Enthalpieübertrager zur Feuchterückgewinnung der Zuluft zu viel Wasser zuführt. Dies könnte nur durch einen Bypass, eine Trockner oder einen Austausch des Enthalpieübertragers durch einen Wärmeübertrager für die entsprechende Jahreszeit verhindert werden. Außerdem können die membranbasierten Übertrager bei zu 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.

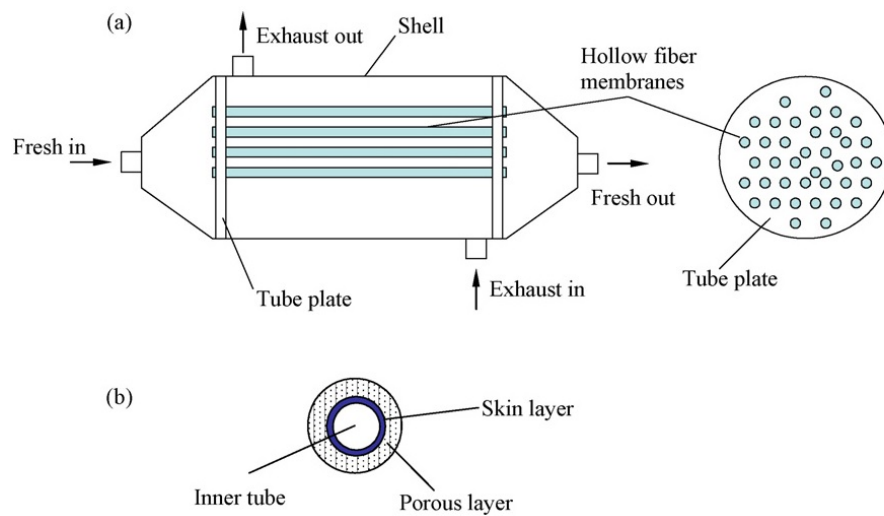


Abbildung 1.2: hollow fibre

### 1.3 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. Daher findet der Stofftransport aufgrund von.... statt. 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. Da im vorliegenden Anwendungsfall Wasserdampf als Permeat die Membran passieren soll und kleine gasförmige Moleküle der Luft, wie Stickstoff zurückgehalten werden sollen, ist eine Dichte Membran sinnvoll, da nur so eine ausreichende Selektivität gegenüber den gasförmigen Komponenten gewährleistet werden kann. Um dennoch eine möglichst hohe Permeabilität gegenüber Wasserdampf zu gewährleisten ist es zielführend eine möglichst dünne Membran zu verwenden. Um die dünnen dichten Membranen mechanische zu stabilisieren wird die dichte Membran in einigen Fällen durch eine poröse Membran gestützt. 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 nehmen und somit auf die Wärmeübergangskoeffizienten und Sorptionseigenschaften an der Membranoberfläche.

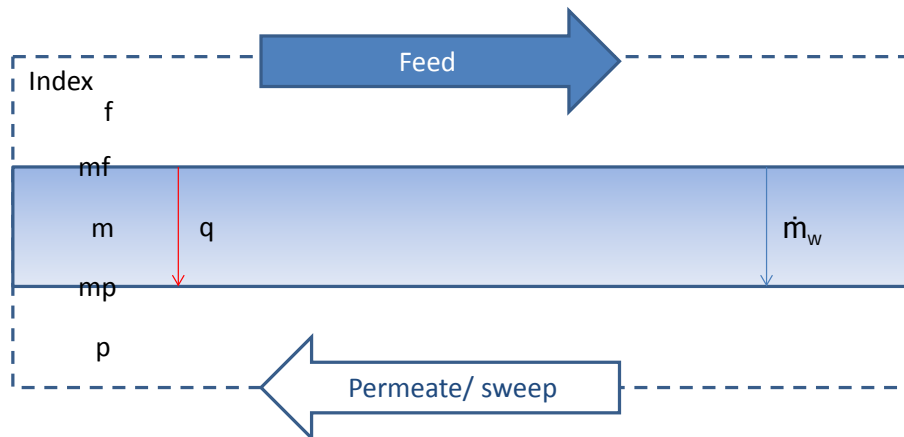


Abbildung 1.3: Membran

In Enthalpieübertragern werden derzeit Membranen aus Papier oder Polymeren eingesetzt. Die technische Weiterentwicklung der Polymermembranen über die letzten Jahre hat dazu geführt, dass mittlerweile fast ausschließlich Polymermembranen zum Einsatz kommen, da diese deutlich höhere Permeabilitäten aufweisen.

Ein klassischer Vergleich über Wirkungsgrade, ist nur bedingt sinnvoll. Die dabei bisher verwendeten Wirkungsgrade sind der Wärmeübertragungsgrad  $\eta_t$  und der Enthalpiewirkungsgrad  $\eta_h$ . Der Wärmeübertragungsgrad hängt dabei rein von der thermischen Energie ab,

Der Enthalpiewirkungsgrad beschreibt die gesamte übertragene Energie, also inklusive der Enthalpie die im übertragenen Wasserdampf steckt,

Der Wärmeübertragungsgrad bei einem reinen Wärmeübertrager ist fast immer größer, als bei einem Enthalpieübertrager und andersherum weist der Enthalpieübertrager einen größeren gesamten Enthalpiewirkungsgrad auf. Da membranbasierte Enthalpieübertrager unregelmäßig Feuchte in den Zuluftstrom übertragen, ist die eine Bewertung anhand der Gesamtenthalpie oft nicht gerecht-

fertigt, da teilweise mehr feuchte übertragen wird als benötigt. Der Wärmeübertragungsgrad stellt kein geeignetes Vergleichskriterium dar, da die übertragene Feuchte nicht berücksichtigt wird, die eine Hauptfunktion des Enthalpietauschers darstellt.

In dieser Arbeit sollen insbesondere membranbasierte Enthalpietauscher untersucht werden und Vergleichsgrößen die gefunden werden, die eine Energierückgewinnung mittels Enthalpietauschern mit anderen Systemen vergleichbar machen. Des Weiteren soll ein Modell der Enthalpieübertrager angefertigt werden, das zukünftig als Grundlage für Simulationen und für eine Weiterentwicklung der Modelle dienen soll, um Enthalpieübertrager auch in größeren Systemen simulativ einbinden zu können.

## 1.4 Stand der Technik

Bisherige Veröffentlichungen zu Untersuchungen beschreiben vor allem Kennzahlermittlungen und die Genauigkeit bestimmter Modell-Ansätze. Für einen Überblick über die Veröffentlichungslage und den derzeitigen Stand der Technik empfehlen sich vor allem die Artikel.... Als Modelle werden vor allem 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 zu beschreiben. Grundsätzlich lassen sich die Publikationen in Bewertungs- beziehungsweise Komponentenoptimierungsorientierte und Modellermittelnde Untersuchungen unterteilen. Die bewertungsorientierten Arbeiten nutzen für den Vergleich verschiedener Bauweisen, Geometrien und Prinzipien vor bekannte Bewertungsgrößen wie die den Wärmeübertragungsgrad, die 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. Hierbei kommen vor allem Größen zum Einsatz, die die unterschiedlichen für sich einzeln bereits bekannten Teilbereich der ablaufenden Prozesse in Beziehung zueinander setzt. So lassen sich die Strömungseigenschaften, die Wärmeübertragung und die Feuchteübertragung getrennt voneinander betrachten und mit Kennzahlen, die ggf. von gewissen Parametern abhängen miteinander verknüpfen. Außerdem wurden in verschiedenen Artikeln unterschiedliche Annahmen überprüft beziehungsweise ihre Gültigkeit validiert.

In dieser Arbeit soll im Gegensatz dazu ein Modell eines ermittelt werden das einen kommerziell einsatzfähigen Enthalpieübertrager beschreibt. Dabei liegt der Schwerpunkt nicht auf der Ermittlung der physikalischen Grundwerte oder Gültigkeit der physikalischen Modelle und der zu Grunde liegenden Annahmen sondern auf der Beschreibung des Verhaltens des praktische eingesetzten Systems unter bestimmten Umgebungsbedingungen und in bestimmten Anwendungsfällen. Der

Schwerpunkt liegt hier wiederum auf dem deutschen Klimaraum und dem Einsatz in Wohnraumlüftungen. Ziel ist eine Modell zu generieren das Abhängig von Anforderungsprofilen und Umgebungsbedingungen eine Bewertung der Enthalpieübertragern insbesondere im Vergleich zu alternativen Systemen, wie z.B. Speicherenthalpieübertragern und klassischen Wärmeübertragern mit entsprechender Lufttrocknung. Zu diesem Zweck sollen auch Bewertungsgrößen definiert werden die einen sinnvollen Vergleich der verschiedenen Größen zulassen.

**Enthalpieübertrager** Ein membranbasierter Enthalpietauscher nutzt die selektiven Eigenschaften einer Membran um einen Konzentrationsausgleich an Wasser zwischen den beiden Luftströmen auszugleichen. Dabei werden ansonsten die Funktionsweisen und Geometrien von klassischen Wärmeübertragern genutzt. Entsprechend lassen sich Kreuz-, Gegenstrom, Kreuz-Gegenstrom- und Gleichstrom Geometrien realisieren. Wobei die Kreuzstromgeometrie die am weitesten Verbreitete Geometrie ist, da sie die einfachste und kostengünstigste Version darstellt. Mit der Gegenstromgeometrie lässt sich der höchste Wirkungsgrad erreichen. Deshalb kommt auch diese Geometrie, sowie die Kreuz-Gegenstromgeometrie, als Kompromiss zwischen Gegenstrom- und Kreuzstromgeometrie, zum Einsatz. Ein weitere Unterscheidungskriterien sind der Anwendungsbereich, die Richtung des Feuchtetransports, die verwendete Membran,

Klassischer Anwendungsbereich dieser Enthalpietauscher ist bisher die Einzelraumlüftung für Wohnungen und Büroräume. Aber auch größere Anwendungen sind mittlerweile möglich. Bisher liefern viele Anbieter die Lüftungsgeräte mit der Option aus den Enthalpietauscher im Sommer gegen einen Wärmeübertrager zu tauschen. Dies ist der Problematik geschuldet, dass die Enthalpieübertrager im Gegensatz zu den Rotationsübertragern nicht regelbar sind. Es besteht die Befürchtung, dass die im Sommer, wenn die Luftfeuchtigkeit in der Zuluft ohnehin hoch ist, eine weitere unregelte Anfeuchtung zu Schimmelbildung und Feuchteschäden führen kann. Hierzu gibt es in der Literatur verschiedene Ansichten. ...

Membranen sind bereits seit langem bekannt und kommen in technischen Bereichen bereits in vielen Gebieten zur Anwendung. Dabei unterliegen die ablaufenden Prozesse und Trennverfahren unterschiedlichen physikalischen Ursachen. In Enthalpieübertragern wird eine hohe Permeabilität der Membran gegenüber Wasser gefordert und eine geringe Permeabilität gegenüber verschiedenen Gasen, wie zum Beispiel Kohlenstoffdioxid und Stickstoff. Entsprechend werden in dieser Arbeit auch nur Membranen und ihre physikalischen Grundlagen behandelt, die diese Eigenschaften erfüllen. Um eine ausreichende Isolierung gegen Gase zu erhalten ist es sinnvoll dichte Membranen zu nutzen. Naheliegend sind Membranen, die auf osmotischen Prinzipien beruhen. Osmotische Membranen werden bisher vor allem eingesetzt, um Wasser zu reinigen.

**Tabelle 1.1:** Das ist eine Testtabelle

<b>Überschrift links</b>	<b>Überschrift rechts</b>
links oben	rechts oben
links unten	rechts unten

## 2 Teil2

### 2.1 Modell

#### 2.1.1 Stofftransport

##### allgemein

Die im untersuchten Enthalpieübertrager verwendete Membran besteht aus einer dichten Grundschichten und einer porösen Stützschrift. 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 die folgende Abbildung 2.1.

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

In einem zweiten Schritt absorbiert die Membranoberfläche den Wasserdampf.

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

Im vierten Schritt desorbiert das Wasser an der zuluftseitigen Oberfläche der Membran in die Zuluft.

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

Wie oben beschrieben führt eine Betrachtung der 6 Prozessschritte als Reihenschaltung zu einer guten Beschreibung des Stofftransportes. Dies geschieht analog zur Elektrotechnik. Entsprechend ergibt sich der Gesamtwiderstand  $W_{ges}$  der Membran aus einer Addition der Einzelwiderstände von dichter Membran  $W_d$  und poröser Membran  $W_p$ :

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

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 das parallel Ablaufen von konvektiven und diffusiven Stofftransportprozessen.

### Sorption an Membranoberfläche

Die Triebkraft des Sorptionsprozesses ist eine Differenz im chemischen Potential. Meist werden hydrophile Membranmaterialien 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 Stoffes  $i$  in der Membranoberfläche. Diese Lösungs-Gleichgewichtsmodell ist insbesondere von Lösungen anderer Aggregatzustände bekannt. 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. Demnach stellt sich in der Membranoberfläche eine Feuchtebelastung  $\Theta$  von

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

ein. Wobei  $\omega_{max}$  die maximal mögliche Feuchte im Membranmaterial angibt,  $c$  eine Materialkonstante ist, die den Einfluss der Wasseraffinität der Membran widerspiegelt und  $\Phi$  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 in der Membran. In der Literatur wird der Zusammenhang für den örtlichen Gradienten des chemischen Potentials und der übertragenen Stoffmenge ebenfalls als linear angenommen. Für den Stoffmengentransport ist aus physikalischen Membranmodellen die Gleichung

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



bekann, wobei  $\dot{n}''$  der Stoffmengenstrom über die Membran ist und  $b_{iM}$  die Beweglichkeit der diffundierenden Moleküle angibt. Für den Diffusionsmassenstrom  $J_i$  ergibt sich ein proportionaler Zusammenhang zum Gradienten des chemischen Potentials  $\mu$

$$J_i = -L_i * \frac{d\mu_i}{dx} \quad (2.5)$$

wobei  $L_i$  der Proportionalitätsfaktor ist.

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

$$\mu_i(T, p, c_i) = \mu_i^\circ(T, p^\circ) + R^1 T * \ln(a_i(T, p^\circ, c_i)) + v_i * (p - p^\circ) \quad (2.6)$$

wobei  $P^\circ$  der Standarddruck ist,  $a_i$  die Aktivität des Stoffes  $i$  und  $v_i$  das Molvolumen des Stoffes  $i$ .

Unter der Voraussetzung einer idealen Gasmischung entfällt der Druckterm

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

In Untersuchungen von .... ist diese Annahme äußerst genau bestätigt worden.

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  $\gamma_i$  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.

Aus den getroffenen 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.

---

<sup>1</sup>ideale Gaskonstante = 8.314 J/mol/K

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

$$J_i = \frac{-L_i * RT}{c_i} * \frac{dc_i}{dx} \quad (2.10)$$

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

$$J_i = D_i * \frac{c_{ifm} - c_{ipm}}{\delta} \quad (2.11)$$

wobei  $c_{ifm}$  und  $c_{ipm}$  die Stoffmengenkonzentrationen in der feedseitigen beziehungsweise in der permeatseitigen 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 Porenausrichtung 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 und 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 Stofftransportes. Die Auswirkungen der Konzentrationspolarisation sind aber im hier betrachteten Fall gering, da der Permeatstrom im Vergleich zum Gesamtmassenstrom gering ist.

## 2.1.2 Zusammenfassend



**Abbildung 2.1:** Membranprozesse

## Literaturverzeichnis

[Streblow 2010] STREBLOW, Dr.-Ing. R.: *Thermal Sensation and Comfort Model 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 Regelialien. Es ist ein paradiesmatisches Land, in dem einem gebratene Satzteile in den Mund fliegen. Nicht einmal von der allmächtigen Interpunktion 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 erklommen 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 zigital 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 Regelialien. Es ist ein paradiesmatisches Land, in dem einem gebratene Satzteile in den Mund fliegen. Nicht einmal von der allmächtigen Interpunktion 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 erklommen 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 zimal 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 Spitzen: Elber, Janca und dann Zickler. Wir müssen nicht vergessen Zickler. Zickler ist eine Spitzen 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 25. Juni 2016

Name hier bitte einfügen