

## Masterarbeit

# **Aufbau einer experimentellen Umgebung und Messungen zur Bewertung verschiedener Abtaumethoden bei Luftkühlern**

Set-up of an experimental environment and measurements for evaluating different defrosting  
methods for air coolers

Aachen, 8. Juni 2016

**Tobias Czarnecki**

Matrikelnummer: 297221

betreut von:

Dipl.-Ing. Henning Freitag

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

Eine Vereisung des Verdampfers in einem Kältekreislauf führt zu einer Minderung des übertragenen Wärmestroms sowie des Anlagenwirkungsgrads. Der vereiste Wärmeübertrager muss daher von Zeit zu Zeit abgetaut werden. Dafür werden in der Praxis sowohl elektrische als auch Heißgas-Abtaumethoden eingesetzt.

Zur genaueren Untersuchung dieser Strategien wird ein experimenteller Aufbau eines Kältekreislaufes mit austauschbarem Luftkühler modifiziert. Im Kältekreislauf installierte Temperatur- und Drucksensoren sowie eine elektrische Leistungsmessung erlauben die energetische Bilanzierung aller einzelnen Komponenten des Kältekreises.

Ein bereits vorhandener Wägebau für die Messung der Massenänderung des Luftkühlers wird optimiert. Ein Konzept für einen mobilen Aufbau zur Untersuchung verschiedener Prüflinge wird erstellt und ein Kalibrierungsverfahren für den optimierten Wägebau entwickelt. Ziel ist die Messung der zeitlich veränderlichen Eis- bzw. Tauwassermenge im Luftkühler im Normal- bzw. Abtaubetrieb sowie die Veränderung des 2D-Schwerpunktes des Luftkühlers. Das Auslesen der Messdaten erfolgt automatisiert.

Für den Kältekreislauf wird softwareseitig ein Steuerungskonzept entworfen und mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung der Fa. Beckhoff umgesetzt. Die SPS ermöglicht einen vollautomatisierten Betrieb des Kältekreislaufs nach Nutzervorgabe sowie das Auslesen aller Sensoren und die Darstellung der Messwerte. Ein softwareseitiger Anlagenschutz inklusive Funktionstest wird in der SPS vorgesehen. Bei Bedarf erfolgt eine Anpassung der Regelparameter.

Nach der Inbetriebnahme des gesamten Systems wird ein Luftkühler in einer Klimakammer unter verschiedenen Randbedingungen vermessen. Neben der Auswertung der Messergebnisse erfolgen eine Bewertung der Messungen hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit sowie eine Abschätzung der Messfehler.

??? Diese Kurzzusammenfassung hat 232 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>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>Vorwort</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Motivation und Ziele</b>	<b>4</b>
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>7</b>
3.1 Kältetechnik . . . . .	7
3.1.1 Kaltdampf-Kälteprozess . . . . .	8
3.1.2 Komponenten eines Kaltdampfprozesses . . . . .	11
3.2 Thermodynamik der feuchten Luft . . . . .	14
3.2.1 Feuchte Luft . . . . .	14
3.2.2 Reif- und Eisbildung . . . . .	16
3.3 Morphologie von Eiskristallen . . . . .	19
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>20</b>
<b>A Wichtiger Anhang 1</b>	<b>23</b>
A.1 Die Versalien . . . . .	23
<b>B Ähnlich wichtiger Anhang</b>	<b>25</b>

# Nomenklatur

## Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_E$	spezifische Wärmekapazität von Eis	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_F$	spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_{pL}$	spezifische Wärmekapazität von Luft	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_{pD}$	spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C$	Wärmekapazität	$\text{W}/\text{kg}$
$E$	Elastizitätsmodul	$\text{N}/\text{mm}^2$
$E$	Exergie	$\text{J}$
$E$	Energie	$\text{J}$
$e$	spezifische Exergie	$\text{J}/\text{kg}$
$g$	Schwerebeschleunigung	$\text{m}/\text{s}^2$
$h$	spezifische Enthalpie	$\text{kJ}/\text{kg}$
$h_K$	spezifische Kondensationsenthalpie	$\text{kJ}/\text{kg}$
$h_S$	spezifische Schmelzenthalpie	$\text{kJ}/\text{kg}$
$h_V$	spezifische Schmelzenthalpie	$\text{kJ}/\text{kg}$
$H$	Enthalpie	$\text{J}$
$\dot{H}$	Enthalpiestrom	$\text{J}/\text{s}$
$I$	Stromstärke	$\text{A}$
$m$	Masse	$\text{kg}$
$\dot{m}$	Massenstrom	$\text{kg}/\text{s}$
$n$	Anzahl	-
$p$	Druck	$\text{Pa}$
$p_D$	Dampfdruck	$\text{Pa}$
$p_L$	Luftdruck	$\text{Pa}$
$P$	Leistung	$\text{W}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

### Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$R$	spezifische Gaskonstante	J/(kg · K)
$S$	Entropie	J/K
$\dot{S}$	Entropiestrom	W/K
$T$	Temperatur	K
$t$	Zeit	s
$U$	innere Energie	J
$U$	elektrische Spannung	V
$U_T$	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(kg · K)
$h$	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> · K)
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /s
$\dot{W}$	Leistung	W
$x$	Wassergehalt	kg/kg
$Y$	Wasserbeladung der Luft	g/kg

### griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\eta_C$	Carnot-Wirkungsgrad	—
$\Phi$	thermische Leistung	W
$\varphi$	relative Feuchte	%
$\rho$	Massendichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Temperaturspreizung	K
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
$\zeta$	Druckverlustbeiwert	-
$\psi$	Sättigungsgrad	%

**Indizes und Abkürzungen**

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
0	Referenzzustand ( <i>ambient dead state</i> )
A	Außen/Umgebung
CV	Kontrollvolumen ( <i>control volume</i> )
defrost	Abtauvorgang
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie ( <i>differential scanning calorimetry</i> )
e	über die Systemgrenze ( <i>external</i> )
el	elektrisch
EV	Expansionsventil
F	Volumenstrom
in	Eingang ( <i>input</i> )
KA	Kälteanlage
KK	Klimakammer
KN	kinetisch
KP	Kompressor
LabVIEW	Programmiersprache und Entwicklungsumgebung für die Messdatenerfassung der Firma National Instruments
L	Luft
m	Mittelwert
Modbus	ein offenes Kommunikationsprotokoll basierend auf einer Master-/Slave-Architektur
out	Ausgang ( <i>output</i> )
PT	Drucksensor
Q	auf einen Wärmestrom bezogen
R	Rücklauf
R 134a	Handelsname von 1,1,1,2-Tetrafluorethan. Eingesetztes Kältemittel
rev	Strömungsumkehrung ( <i>reverse</i> )
RTU	entfernte Terminaleinheit ( <i>Remote Terminal-Unit</i> ). Betriebsart für die Datenübertragung für die Modbus-Kommunikation
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
T	Temperatur
TT	Temperatur-Sensor

Fortsetzung auf der nächsten Seite



**Indizes und Abkürzungen**

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
TwinCat	Automatisierungssoftware der Fa. Beckhoff
$\Delta t$	Zeitschritt der Länge $\Delta t$
t	technisch
V	Vorlauf
V	Verlust (Exergieanalyse)
Visual Studio	Integrierte Entwicklungsumgebung für verschiedene Hochsprachen der Fa. Microsoft. Entwicklungsumgebung für TwinCat
VD	Verdampfer
VF	Verflüssiger

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufteilung der sich in Deutschland in Betrieb befindenden Kältemaschinen je nach Einsatzgebiet und Energieverbrauch im Jahre 2009. [M.Stöckner, 2012] . . . . .	1
1.2	Energieeinsparpotentiale bis 2030 für die Sektoren Haushalt, Gewerbe und Handel, Verkehr und Industrie. [Pehnt et al., 2011] . . . . .	2
2.1	Projektumgebung für den EBC Abtauprüfstand [Freitag, 2015] . . . . .	4
2.2	Aufgabenpakete im Projektzyklus.[Freitag, 2015] Rot umrahmte Arbeitspakete werden in dieser Masterarbeit behandelt und durchgeführt. . . . .	5
3.1	In p,h-Diagramm von einem reinen Fluid [Baehr, 2013] . . . . .	8
3.2	Kreisprozess im ln p,h-Diagramm [Baehr, 2013] . . . . .	9
3.3	Einfacher Kältekreislauf [Baehr, 2013] . . . . .	12
3.4	$h^*$ , X- Diagramm für feuchte Luft bei einem Gesamtdruck $p = 100 \text{ kPa}$ [Baehr, 2013] .	14
3.5	Kristallwachstum auf einer ebenen Oberfläche [Schydlo, 2010] . . . . .	17

## Tabellenverzeichnis

## Vorwort

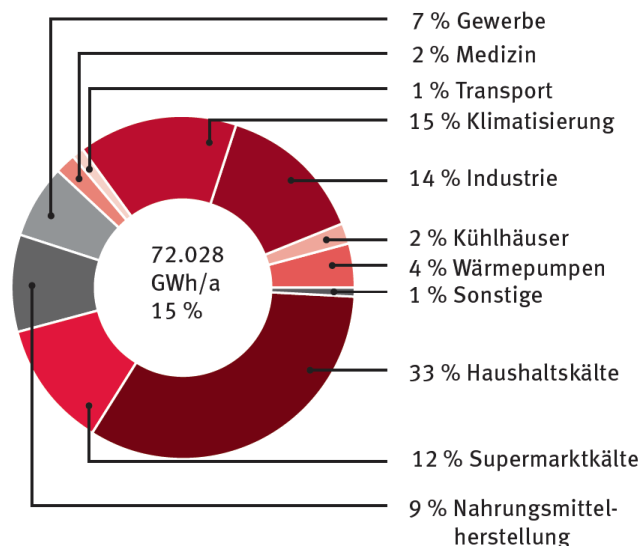
*Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor 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 ??). 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.*

# 1 Einführung

Der technologische Prozess einer Kältemaschine ermöglicht es einer Wärmequelle Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau zu entziehen und diese an eine Wärmesenke auf einem höheren Temperaturniveau wieder abzugeben. Um diesen thermodynamischen Prozess zu ermöglichen muss dem Kältekreislauf, nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, Energie hinzugefügt werden.

Der Einsatzbereich der Kältemaschinen ist äußerst vielseitig. Sie reicht vom häuslichen Kühlschrank bis hin zur industriellen Großkältemaschinen. Für Privatpersonen als auch ganze Industrienationen ist die Kältetechnik unverzichtbar geworden und trägt wesentlich zu der Verbesserung menschlicher Lebensbedingungen bei.

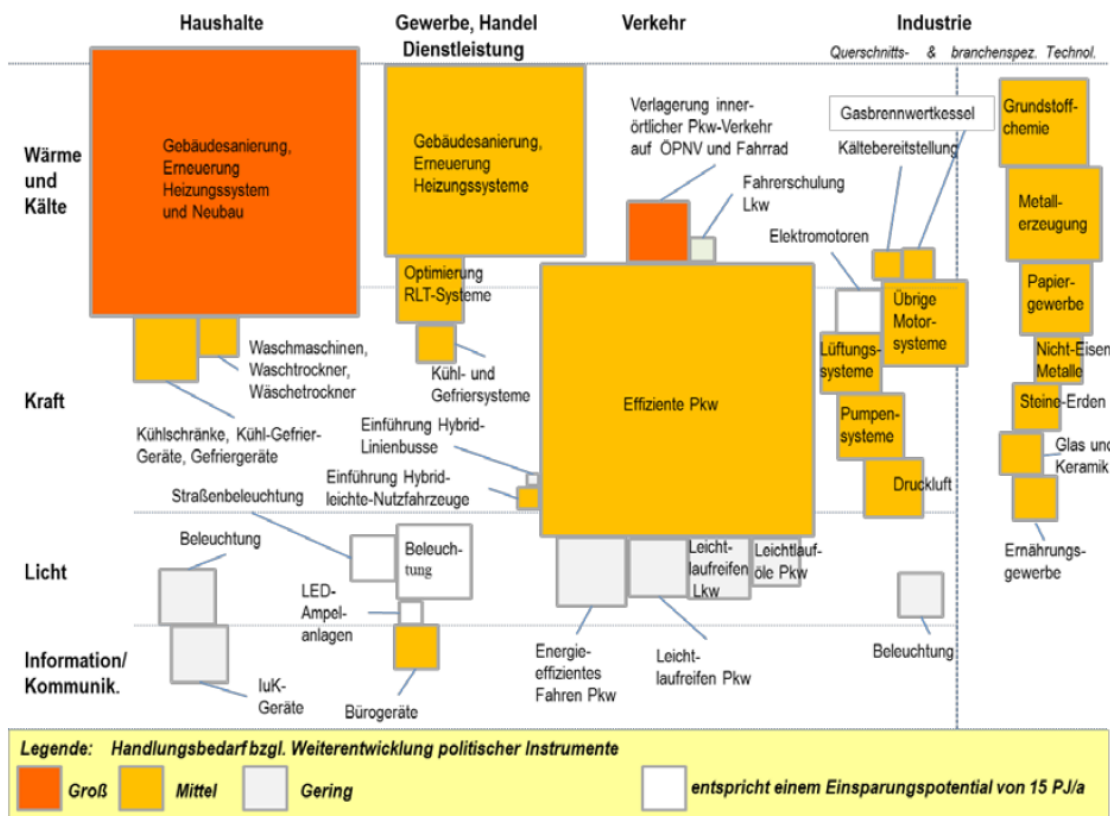
Im Jahre 2009 waren alleine in Deutschland 129 Millionen Kältemaschinen in Gebrauch. 70% Prozent dieser Kältemaschinen wurden elektrisch angetrieben. Folglich ist die wichtigste Technologie zur Erzeugung von Kälte die Kompressionskälteanlage. Der Energieverbrauch für den Betrieb dieser Anzahl an Kältemaschine beliefen sich 2009 nach Schätzungen von Preuß auf ca. 72 Mrd. kWh . Dies entspricht ca. 15 % des nationalen Elektroenergiebedarfs. Die Aufteilung der Kältemaschinen auf ihre Einsatzbereich ist in Abbildung 1.2 dargestellt.



**Abbildung 1.1:** Aufteilung der sich in Deutschland in Betrieb befindenden Kältemaschinen je nach Einsatzgebiet und Energieverbrauch im Jahre 2009. [M.Stöckner, 2012]

Die steigende Nachfrage und Bedarf nach Kälteleistung und damit steigender Verbrauch von Energie zieht eine steigende Klimabelastung mit sich. Auf der einen Seite entsteht eine steigende CO<sub>2</sub> Belastung für die Bereitstellung der Antriebsenergie der Kältemaschinen. Auf der anderen Seite stellt die Belastung der Umwelt durch gegenwärtige und zukünftige ungewollte direkte Kältemittelmissionen mit teils hohen CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen eine Herausforderung dar.

Das Energiekonzept 2010 der deutschen Bundesregierung setzt die Umweltziele der Zukunft fest. Gegenüber dem Jahr 1990 sollen bis 2020 40% und bis 2050 80% der Treibhausgasemissionen eingespart werden. Der Primärenergieverbrauch, bezogen auf das Jahr 2008, soll um 20% bis ins Jahr 2020 und bis 2050 sogar auf 50% reduziert werden. [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2010]



**Abbildung 1.2:** Energieeinsparpotentiale bis 2030 für die Sektoren Haushalt, Gewerbe und Handel, Verkehr und Industrie. [Pehnt et al., 2011]

Um diese Ziele zu erreichen hat Pehnt et al. einen Maßnahmencluster bestehend aus 42 potentielle Maßnahmen zur Energieeinsparung für Deutschland erstellt. Zunächst sind alle Endverbraucher in 4 Gruppen und die Endenergie in 4 Gruppen unterteilt worden. Jeder Maßnahme wird ein *politischer Handlungsbedarf* bezüglich politischer Instrumente zugeteilt. Dabei wird dem Endenergie-

Bereich *Wärme und Kälte* ein *mittleres* bis *großes* Energieeinsparungspotential zugerechnet.

Im Bezug auf Kältemaschinen werden in der Literatur eine Vielzahl an Möglichkeiten und Potential-einschätzungen zur Senkung des Energieverbrauches und Umweltbelastung genannt. Von der Ver-wendung von natürlichen Kältemittel, Wärmerückgewinnung vom Verflüssiger, sowie von Downsi-zing des Kompressors ist die Rede. Laut [EnergieAgentur.NRW, 2010] entfallen bei der elektrischen Leistungsaufnahme einer Kälteanlage:

- ▷ ca.88 % auf den Verdichter
- ▷ ca. 7 % auf den Verflüssiger
- ▷ ca. 5 % auf den Verdampfer.

Folglich ist der Kompressor der größte Energieverbaucher in einer Kälteanlage. Um eine effiziente Kälteanlage zu betreiben, sollte die zu verrichtende Arbeit vom Verdichter so niedrig wie möglich gehalten werden.

In dieser Arbeit sollen verschiedene Abtaumethoden für einen vereisten Luftkühler näher unter-sucht werden, da diese im direkten Zusammenhang mit der Leistungsaufnahme des Verdichters ste-hen. Vereiste Luftkühler führen zu einem Leistungsabfall sowie zu einem erhöhten Stromverbrauch durch den Kompressor. Dadurch muss der Luftkühler zu bestimmten Zeiten abgetaut werden, um das Eis von dem Wärmeübertrager zu entfernen und die ursprüngliche Kälteleistung wieder zur Verfügung stellen zu können.

## 2 Motivation und Ziele

In diesem Kapitel wird die Motivation und die gesetzten Ziele der vorliegenden Arbeit aufgezeigt.

Am *Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate* (EBC) wird in Kooperation mit dem *Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung* (WSA) verschiedene Abtaumethoden für vereiste Luftkühler erforscht. Der Auftraggeber und Kooperationspartner für die Forschungsarbeiten ist der *Forschungsrat Kältetechnik e.V.* Die komplette Projektumgebung ist in der Abbildung 2.1 dargestellt

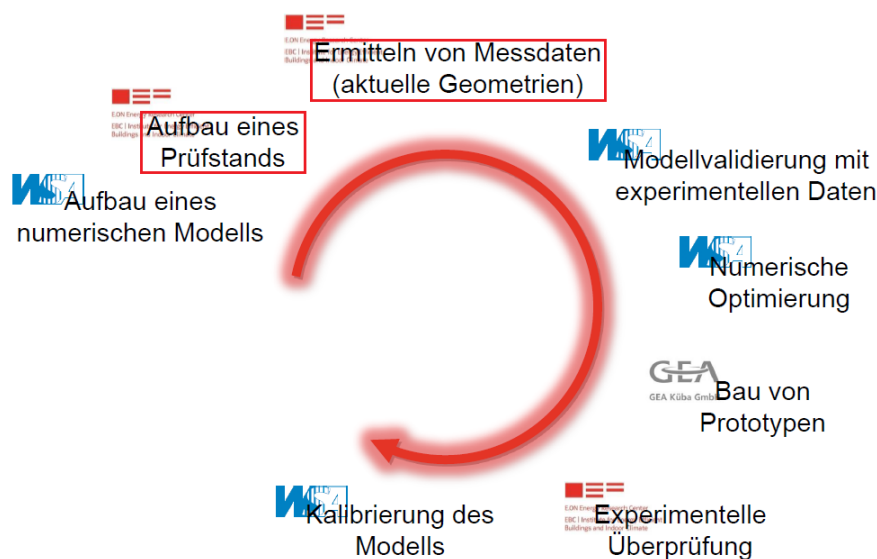


**Abbildung 2.1:** Projektumgebung für den EBC Abtauprüfstand [Freitag, 2015]

Die Motivation zu diesem Forschungsprojekt rührt aus dem simplen Phänomen, dass bei der Unterschreitung des Taupunktes der zu kühlenden, vorbei strömenden Luft zunächst eine Bereifung des Luftkühlers stattfindet. Die Bereifung führt bei einer Verdampfungstemperatur kleiner als 0 °C und somit Unterschreitung des Gefrierpunktes zu einer Vereisung. Die Bereifung führt durch Querschnittsverengungen im Wärmeübertrager des Luftkühlers zu einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit. Diese führt zunächst zu einem erhöhten Wärmeübergang und somit zu einer höheren übertragenden Leistung vom Luftkühler auf die Luft. [Schydlo, 2010]



Eine spätere Bereifung der Lamellen führt zu einem sinkenden Wärmeübergang zwischen der Lamelle und der Luft, da sich das gefrorene Eis aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit wie ein Isolator verhält. Um den eintretenden Leistungsabfall zu kompensieren, wird die Regelung der Kälteanlage die Verdampfungstemperatur verringern. Eine geringere Verdampfungstemperatur bedeutet einen geringeren Betriebsdruck, den der Kompressor bereitstellen muss. Eine höhere Druckdifferenz führt zu einem erhöhten Stromverbrauch und gleichzeitig sinkt der Wirkungsgrad der gesamten Kälteanlage. Aus dieser Kausalkette sollte eine Kälteanlage im Falle einer Vereisung abgetaut werden, um danach wieder seine Nennleistung zur Verfügung stellen zu können.



**Abbildung 2.2:** Aufgabenpakete im Projektzyklus.[Freitag, 2015] Rot umrahmte Arbeitspakete werden in dieser Masterarbeit behandelt und durchgeführt.

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens sind sowohl experimentelle als auch numerische Erkenntnisgewinne im Hinblick auf Reifbildungsvorgänge als auch verschiedener Abtaumethoden bei Luftkühlern in einem Kältekreislauf. Diese Erkenntnisse sollen in eine spätere Datenbasis fließen, die zur energieeffizienten Auslegung von Luftkühlerkomponenten dienen wird.

Das WSA übernimmt hierbei die Entwicklung eines numerischen Simulationsmodelles. Das EBC ist verantwortlich für den Aufbau eines Abtauprüfstand zur Validierung der Simulationsergebnisse. Hierzu wurde bereits in einer vorhergegangenen Masterarbeit von Helmlinger eine Kälteanlage geplant und in Betrieb genommen. Der Luftkühler ist hierbei in einer Klimakammer platziert, in der unterschiedlichste Raumbedingungen eingestellt werden können. Die Luftkühler können getauscht werden, um verschiedene Wärmetauscher-Varianten testen zu können.

Diese Masterarbeit umfasst, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, die Arbeitspakete *Aufbau* (bzw. *Opti-*

*mierung) eines Prüfstandes und Ermitteln von Messdaten.*

Das Arbeitspaket *Aufbau (bzw. Optimierung) eines Prüfstandes* unterteilt sich in

- ▷ Optimierung des Kältekreislaufes: Umsetzung der Verbesserungsvorschläge aus der Masterarbeit von HELMLINGER
- ▷ Entwicklung und Bau eines Wägesystems zur Messung und Bestimmung des 2D-Schwerpunktes der Eismenge im Luftkühler
- ▷ Entwicklung und Implementierung einer Speicher-Programmierbaren-Steuerung (SPS) zur Steuerung, Regelung des Kältekreislaufes und Auswertung des Wägesystems in Echtzeit.
- ▷ Auslegung der Regelparameter für verwendete PID-Regler

Am Ende der Masterarbeit und nach erfolgreichen Abschließen des ersten Arbeitspaketes wird das zweite Arbeitspaket *Ermitteln von Messdaten* durchgeführt. Das setzt sich aus folgenden Punkten zusammen:

- ▷ Durchführung von Reifbildungsversuchen
- ▷ Durchführung von Abtauversuchen mittels verschiedener Abtaumethoden
- ▷ Ermittlung der Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche.

## 3 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden alle für die Masterarbeit relevanten theoretischen Grundlagen erläutert. Zu erst wird in 3.1 die Thermodynamik der Kältetechnik betrachtet.

### 3.1 Kältetechnik

Die Kältetechnik wird in verschiedensten Einsatzgebieten eingesetzt, um Kälte zu erzeugen bzw. einem definierten Raum Energie in Form von Wärme zu entziehen.

Das Konservieren von Lebensmittel ist der ursprüngliche Hauptzweck der Kältetechnik und ist auch heute noch aktuell. Bereits 3000 Jahre v. Chr. nutzten die Ägypter und Mesopotamier Natureis, um ihre Nahrungsmittel länger haltbar zu machen.[Danfoss GmbH, 2006]

Im Jahre 1834 meldete der US-Amerikaner Jacob Perkins sein Patent zum Thema Kältetechnik in England an. Das Patent beschreibt eine Kaltdampfmaschine in einem geschlossenen Kreislauf mit dem feuergefährlichen Äthyläther als Kältemittel.[Siemens Schweiz AG, 2007]

Carl von Linde baute nach konstruktiven Verbesserungen der Kaltdampfmaschine und Verwendung von Ammoniak als Kältemittel im Jahre 1876 die erste praxistaugliche Kälteanlage. Die ersten Anlagen wurden durch die Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg gebaut und an Brauereien sowie später auch an die Schifffahrt vertrieben.

Mit steigender Bedeutung von Elektrizität als Energieträger nach dem 1. Weltkrieg nahm auch die Entwicklung und der Bedarf an Kälteanlagen zu. Im Jahre 1920 startet die Firma General Electric mit der Serienherstellung von Haushaltskühlschränken mit Hermetik-Verdichtern.

Das vielseitige Gebiet der Kältetechnik umfasst alle Technologien, die zur Bereitstellung von Kälteenergie dienen. Sie unterscheiden sich in der benötigten zuzuführenden Energien, Einsatzbereich und eingesetzten Kältemitteln. Zu den wichtigsten und heute meist verwendeten Technologien gehören folgende Technologien

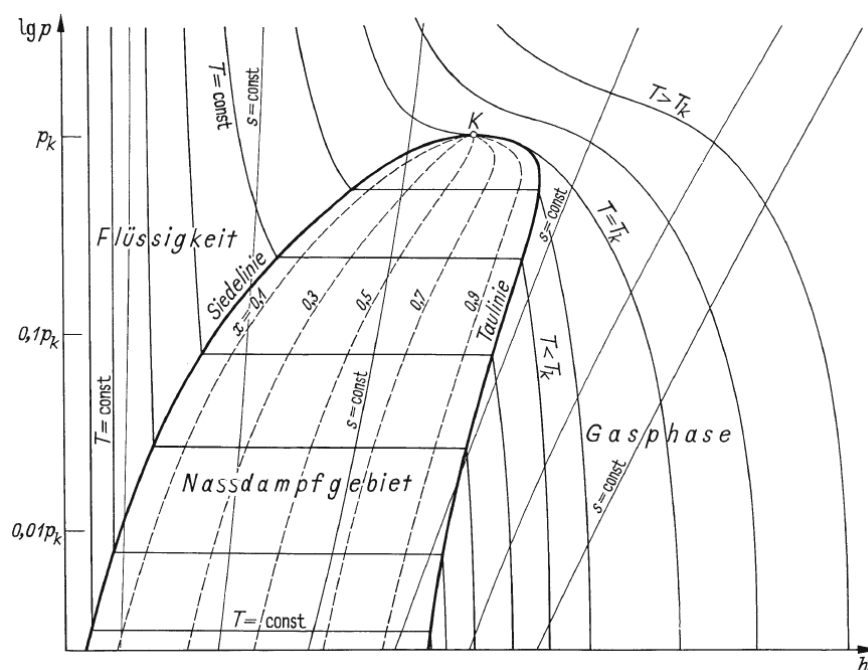
- ▷ Kompressions-Kälteprozess: *Prozess wird angetrieben durch Zufuhr mechanischer Energie*
- ▷ Sorptions-Kälteprozess: *Prozess wird angetrieben durch Zufuhr von Wärmeenergie*
- ▷ Linde-Verfahren.

Weitere nicht so weitverbreitete Technologien der Kältetechnik, jedoch technisch interessante Verfahren sind zB. das *Wirbelrohr*, *Magnetische Kühlung* oder das Kühlen mittels einem Peltier-Element. Diese Verfahren werden meist nur unter hohem Energieverbrauch in Sonderfällen angewandt. [Grote u. Feldhusen, 2014]

Da sich diese Masterarbeit mit dem Aufbau eines Prüfstandes zur Untersuchung von Abtaumethoden einer Kompressionskälteanlage beschäftigt, wird in den folgenden Kapitel ausschließlich auf diese Technologie eingegangen. Für weitere Informationen bezüglich der anderen Technologien sei an dieser Stelle auf die Literatur [Baehr, 2013], [Grote u. Feldhusen, 2014] und [Grote u. Feldhusen, 2014] verwiesen.

### 3.1.1 Kaltdampf-Kälteprozess

In diesem Abschnitt wird die Thermodynamik des Kaltdampf-Kälteprozesses näher erläutert. Der Kaltdampf-Kälteprozess ist ein linksläufiger *Clausius-Rankine-Kreisprozess*. Die Zustandspunkte des verwendeten Kältemittels im  $\ln p, h$  Diagramm sind in Abbildung 3.1 dargestellt.



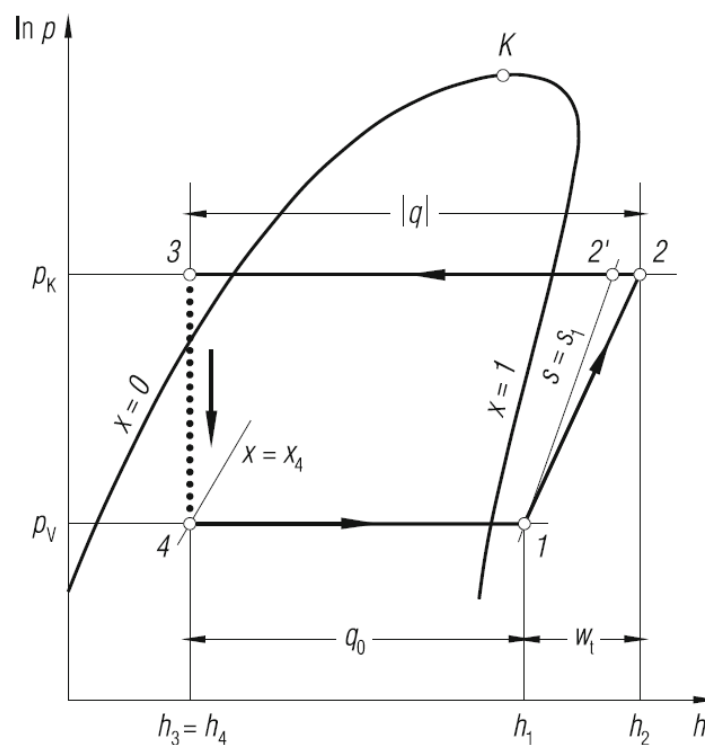
**Abbildung 3.1:**  $\ln p, h$ -Diagramm von einem reinen Fluid [Baehr, 2013]

Das halb-logarithmische Diagramm ist ein vielgebrauchtes und hilfreiches Mittel in der Kältetechnik-Branche. <sup>1</sup> Im Diagramm 3.1 ist der Druck logarithmisch auf der y-Achse und die spezifische Ent-

<sup>1</sup>Das Zustandsdiagramm wurde vom deutschen Ingenieur Richard Mollier (1863-1935) im Jahre 1924 erstmalig vorgestellt.

halpie  $h$  auf der  $x$ -Achse eingetragen. Die Siedelinie ist durch  $x = 0$  und die Taulinie durch  $x = 1$ . Zwischen  $0 \leq x \leq 1$  befindet sich das Nassdampfgebiet. Es liegt ein Gemisch aus gasförmigen und flüssigem Kältemittel vor. Der Anteil des Gases im Nassdampfgebiet wird durch  $x$  ausgedrückt,  $1 - x$  den Anteil der Flüssigkeit.

In dem Diagramm 3.2 sind alle Zustandspunkte bei einem Durchlauf des Kältekreislaufes abgebildet. Innerhalb des Nassdampfgebietes verläuft in einem idealen Kältekreislauf, eine Zustandsänderung *isotherm* und *isobar* ab. Wärmezufuhr führt nicht zu einer Erhöhung der Temperatur, sondern zu einer Veränderung vom Gas- bzw. Flüssigkeitsanteil. Es wird von einer *latenten*, also nicht fühlbaren, Wärmeänderung geredet. Um einen Tropfen flüssigen Wasser, dessen Zustand sich auf der Siedelinie befindet, in einen gasförmigen Zustand, sprich  $x = 1$  zu überführen, muss ihm die spezifische Verdampfungsenthalpie  $\Delta h$  zugeführt werden. Verläuft die Zustandsänderung entgegengesetzt kondensiert der Tropfen und gibt die Verdampfungsenthalpie  $\Delta h$  an seine Umgebung ab. Außerhalb des Nassdampfgebietes führt eine Wärmezufuhr oder -abfuhr zu einer Veränderung der Temperatur. Die Wärmeänderung ist *sensibel*.



**Abbildung 3.2:** Kreisprozess im  $\ln p, h$ -Diagramm [Baehr, 2013]

In einem Kaltdampfprozess, sprich ohne Verluste durch Reibung, finden folgende vier Teilprozesse statt:

- 1  $\longrightarrow$  2 Kompression des dampfförmigen Kältemittels unter der Zuführung von elektrischer Leistung  $P_{KM}$
- 2  $\longrightarrow$  3 Abkühlung, Kondensation und Unterkühlung des Kältemittels unter der Abgabe der Wärmeenergie  $\dot{Q}$  über den Verflüssiger an die Umgebung
- 3  $\longrightarrow$  4 Entspannung des flüssigen Kältemittels durch das Drosselventil; teilweise setzt die Verdampfung des Fluids ein
- 4  $\longrightarrow$  1 Verdampfung des noch flüssigen Kältemittels auf niedrigem Druckniveau unter der Aufnahme des Wärmestromes  $\dot{Q}_0$  aus dem Kühlraum

Der Prozess findet auf zwei Druckniveaus statt: dem Verdampfungsdruck  $p_V$  und dem Kondensationsdruck  $p_K$ . Die Verflüssigung des Kältemittels findet auf hohem Druckniveau und die Verdampfung auf niedrigem Druck statt. Die höchste Temperatur wird nach der Kompression am Zustandspunkt 2 erreicht; er befindet sich im Überhitzen- und Hochdruckbereich. Die niedrigste Temperatur ist kurz nach dem Drosselventil und vor dem Verdampfer am Punkt 4. auf niedrigem Druckniveau.

Nach dem Anwenden des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik, die Erhaltung der Energie in einem System, auf den Kältekreislauf folgt die Gleichung :

$$|\dot{Q}| = \dot{Q}_0 + P_{KM}. \quad (3.1)$$

Die elektrische Antriebsleistung der Kältemaschine ist die aufgenommene elektrische Leistung durch den Kompressor zwischen den Zustandspunkten 1 und 2. Sie ergibt sich zu:

$$P_{KM} = \dot{m} w_t = \dot{m} (h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}}{\eta_{sV}} (h_{2'} - h_1). \quad (3.2)$$

Hierbei ist  $\eta_{sV}$  der isentrope Wirkungsgrad des Kompressors. Der isentrope Wirkungsgrad setzt den realen Kältekreislauf in ein Verhältnis zum idealen Kältekreislauf. Die Überhitzung des Gases am Austritt des Kompressors ist höher als die Überhitzung nach einer isentropen Verdichtung. Daraus folgt eine höhere Energieaufnahme durch den Kompressor und ein höherer Wärmestrom  $\dot{Q}$ , der über den Verflüssiger an die Umgebung abgegeben werden muss. Der isentrope Wirkungsgrad ist definiert über

$$\eta_{sV} := \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1}. \quad (3.3)$$

Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  wird über den Verflüssiger zwischen den Zuständen 2 und 3 abgeführt. Die Formel von  $\dot{Q}$  lautet:

$$\dot{Q} = \dot{m} q_0 = \dot{m} (h_3 - h_2) < 0. \quad (3.4)$$

Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  ist immer kleiner als Null; er wird dem Kreislauf folglich entzogen.

Über ein Drosselorgan wird das Kältemittel vom hohen Druckniveau auf das niedrigere Druckniveau entspannt. Der Teilprozess findet zwischen den Zustandspunkten 3 und 4 statt und wird als *isenthalp* angenommen.

Die Kälteleistung  $\dot{Q}_0$ , sprich den aus dem Kühlraum zu entnehmender Wärmestrom, ergibt sich aus dem Kältemittel-Massenstrom  $\dot{m}$  und den spezifischen Enthalpien der Zustände 4 und 1 :

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} q_0 = \dot{m} (h_1 - h_4). \quad (3.5)$$

Die Bewertung einer Kälteanlage erfolgt durch die Leistungszahl  $\epsilon_{KM}$ :

$$\epsilon_{KM} := \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{KM}}. \quad (3.6)$$

Ziel bei der Auslegung und dem Betrieb einer Kältemaschine ist eine möglichst große Leistungszahl zu erlangen. Damit  $\epsilon_{KM}$  groß wird, muss die Kälteleistung  $\dot{Q}_0$  groß werden und die aufgewandte Verdichterleistung  $P_{KM}$  klein werden.

### 3.1.2 Komponenten eines Kaltdampfprozesses

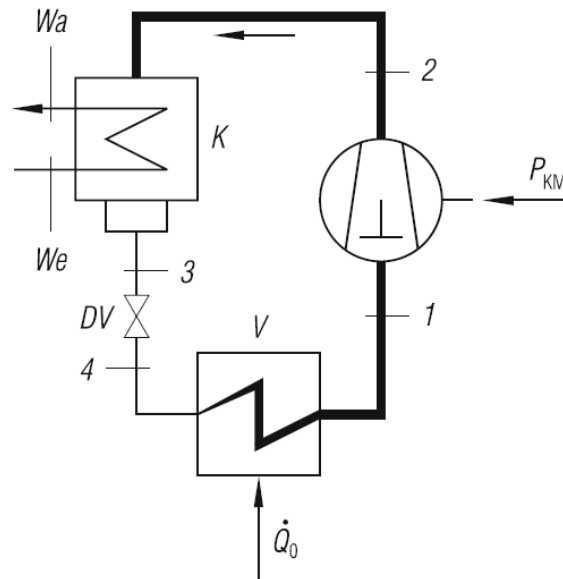
Die Komponenten für einen einfachen Kaltdampfprozess besteht aus vier Komponenten:

- ▷ der Kompressor
- ▷ der Verflüssiger
- ▷ das Drosselventil Expansionsventil
- ▷ der Verdampfer.

In Abbildung 3.3 sind die vier Komponenten mit ihren Zustandspunkten dargestellt.

#### Der Kompressor

Der Kompressor bildet das Herzstück der Kälteanlage. Er verdichtet das gasförmige Kältemittel von niedrigem Druck auf ein höheres Druckniveau. Um diese Arbeit zu verrichten, wird der Verdichter mit elektrischer Energie versorgt. Der Kompressor gibt es in verschiedenen Bauvarianten. Die



**Abbildung 3.3:** Einfacher Kältekreislauf [Baehr, 2013]

zwei wichtigsten Bauvarianten sind der *Hubkolbenverdichter* und der *Rotationskolbenverdichter*. Die Baugruppen der Verdichter werden in offene, halbhermetische und vollhermetische Verdichter unterschieden. Schrauben-, Scroll- sowie Turboverdichter sind Bauarten der *Rotationskolbenverdichter*.

Ein wichtiges Kriterium bei Verdichtern ist das Druckverhältnis von Ansaugdruck, vor der Kompression, und dem Ausgangsdruck. Das Druckverhältnis  $\pi$  ist definiert als:

$$\pi := \frac{p_{aus}}{p_{ein}}. \quad (3.7)$$

### Der Verflüssiger

Dem Kältemittel wird im Verflüssiger auf einem hohen Druckniveau Wärme entzogen. Der Verflüssiger kühlt das überhitzte, gasförmige Kältemittel ab. Beim Austritt aus dem Verflüssiger ist das Kältemittel meist vollständig kondensiert. Um einen Wärmeentzug zu bewerkstelligen gibt es drei Bautypen:

- ▷ Wassergekühlte Verflüssiger
- ▷ Luftgekühlte Verflüssiger
- ▷ Verdunstungsverflüssiger



Wassergekühlte Verflüssiger können, aufgrund der besseren Wärmeübertragung verglichen zu Luft, sehr kompakt gebaut werden. Eine typische Bauform ist das *Bündelrohrverflüssiger*. In der Praxis werden am häufigsten luftgekühlte Verflüssiger eingesetzt. Um die gleiche Kühlleistung wie ein wassergekühlter Verflüssiger zu erreichen, werden Lamellen und Ventilatoren eingesetzt. Die Lamellen vergrößern die Fläche für die Wärmeübertragung mit der Luft. Ventilatoren ermöglichen durch einen höheren Luftdurchsatz und der daraus resultierendem höhere Wärmeübertragung eine größere Kühlleistung und eine kompaktere Bauform der Wärmeübertragers. Diese Variante hat den Vorteil, dass die einen wartungsfreien Betrieb sowie eine einfache Reinigung ermöglicht.

### Das Expansionsventil

Das Expansionsventil versorgt den Verdampfer mit dem nötigen Kältemittel-Massenstrom. Die Zuführung des Kältemittels erfolgt über eine Druckdifferenz. Durch eine lokale Verengung des Strömungsquerschnitts, verringert sich der Druck des durchfließenden Kältemittels. Das Kältemittel vergrößert sein Volumen und es kommt zur Expansion. Die Druckreduzierung erfolgt ohne zusätzliche Arbeit. Im idealen Fall wird bei diesem Prozess auch keine Wärme abgeführt; der Prozess ist *isenthalp*. Das Expansionsventil trennt zusammen mit dem Kompressor die zwei Druckseiten des Kältekreislaufes. Es gibt Expansionsventile sowohl als regelbare und nicht regelbare Ausführungen. Bei kleineren Anlagen erfolgt die Expansion unregelmäßig zum Beispiel durch Kapillarrohre. Geregelte Expansionsventile werden in mittleren und großen Kälteanlagen eingesetzt. Die Regelung erfolgt durch die Querschnittsänderung und dem damit einhergehendem Druckabfall.

### Der Verdampfer

In dem Verdampfer wird das Kältemittel eingespritzt. Das Kältemittel verdampft und entzieht seiner Umgebung dabei Wärme. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen an Verdampfer, gibt es eine Vielzahl an Bauarten für Verdampfer. Mögliche Bauarten sind

- ▷ Glattrohrverdampfer
- ▷ Beripptes Verdampferregister
- ▷ Rippenrohrverdampfer

Um eine möglichst große Kälteleistung zu ermöglichen, werden wie beim Verflüssiger auch, Ventilatoren eingesetzt. Die Ventilatoren erzwingen einen Luftstrom durch den Verdampfer und erhöhen damit die Wärmeübertragung zwischen der Luft und den Verdampferrohren.

### 3.2 Thermodynamik der feuchten Luft

Ein Verdampfer hat die Aufgabe einer Umgebung Energie in Form von Wärme zu entziehen. Hierfür wird in einem Wärmeübertrager flüssiges Kältemittel verdampft. Das verdampfende Kältemittel kühlt zunächst den Wärmeübertrager, danach wird über die Wärmeübertrager-Lamellen der vorbeiströmende Luft Wärme entzogen.

Bei dem Kühlprozess durch einen Verdampfer kommt es zwischen dem Wärmeübertrager und der feuchten Luft verschiedenen thermodynamischen Phänomenen. Die auftretenden Phänomene lassen sich in folgende Gruppen einordnen:

- ▷ Abkühlung der feuchten Luft
- ▷ Wassertropfenbildung auf Lamellenoberfläche
- ▷ Kristallbildung auf Lamellenoberfläche.

In den nachfolgenden Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 werden die Phänomene kurz erklärt.

#### 3.2.1 Feuchte Luft

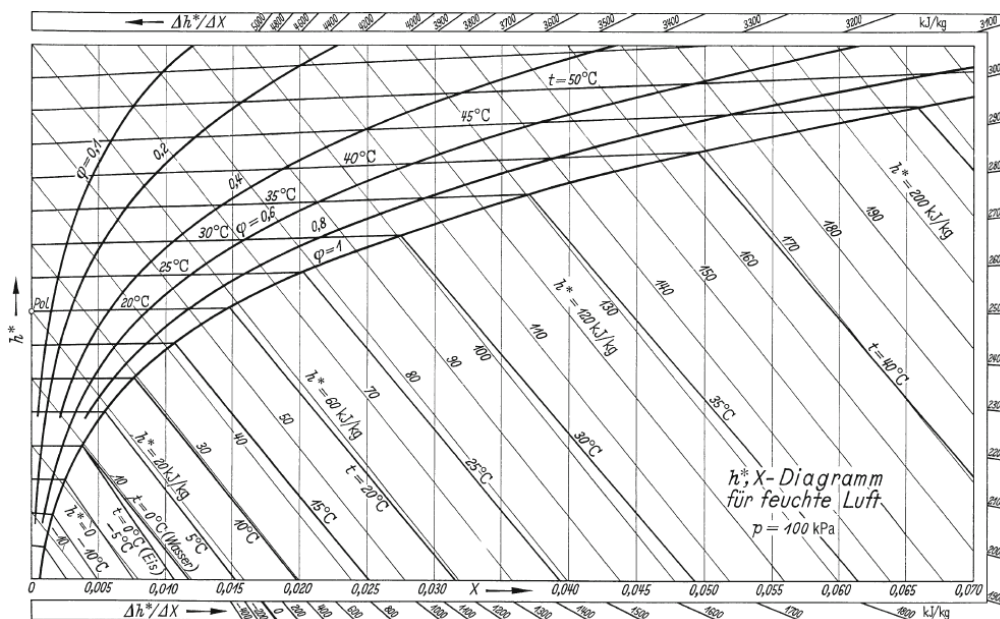


Abbildung 3.4:  $h^*$ ,  $X$ -Diagramm für feuchte Luft bei einem Gesamtdruck  $p = 100$  kPa [Baehr, 2013]

Bei dem Wärmeentzug durch den Verdampfer wird zunächst die noch nicht gesättigte feuchte Luft abgekühlt. Luft besitzt die Eigenschaft eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen zu können. War-

me Luft kann mehr Wasser aufnehmen als kalte Luft. Das Verhältnis von der aufgenommenen Masse Wasser zur Masse Luft ist definiert als Beladung:

$$X = \frac{m_W}{m_L}. \quad (3.8)$$

In dieser Formel bezieht sich  $m_W$  auf gasförmige, flüssige oder feste Form von Wasser und  $m_L$  auf die Masse der trockenen Luft.  $X$  kann werden zwischen 0 für trockene Luft und  $\infty$  für reines Wasser annehmen. In der Regel bleibt  $X$  jedoch kleiner als 0,1.

Die absolute Feuchte ist definiert als das Verhältnis von Masse des Wasserdampfers  $m_W$  zum eingenommen Volumen  $V$  der feuchten Luft. Die Formel lautet:

$$\varrho := \frac{m_W}{V} = \frac{p_W}{R_W T}. \quad (3.9)$$

Die relative Feuchte  $\varphi$  ist das Verhältnis der absoluten Feuchte im Verhältnis zur Maximalwert oder Sättigungswert der absoluten Feuchte:

$$\varphi := \frac{\varrho}{\varrho_W^s}. \quad (3.10)$$

Wird nun in die Gleichung 3.8 die relative Feuchte aus Gleichung 3.10 eingesetzt, ergibt sich eine weitere Formel für die Beladung  $X$ .

$$X = \frac{m_W}{m_L} = 0,622 \frac{p_W^s}{p/\varphi - p_W^s}. \quad (3.11)$$

Hierbei ist  $p_W^s$  der Partialdruck des Sättigungspunktes. Betrachtet man nur die Wasserdampfbeladung der Luft, so lässt sich feststellen, dass die maximale Menge an aufzunehmenden Wasser einen Grenzwert hat. Dieser Grenzwert wird Sättigungswert der Wasserdampfbeladung genannt und ist eine Funktion abhängig von der Temperatur und dem Druck. Sie berechnet sich nach dem Gesetz von Dalton zu :

$$X_s(T, p) = 0,622 \frac{p_W^s}{p - p_W^s}. \quad (3.12)$$

Bei der Abkühlung von feuchter Luft kann der Fall eintreten, dass  $X > X_s$  ist. Sprich die Beladung der trockenen Luft ist größer als das alles im Wasserdampf aufgenommen werden kann. Der erste Tropfen Kondensat bildet sich und Wasser fällt aus. Es ergibt sich eine Kondensationsmenge von:

$$\Delta X m_L = (X - X_s) m_L. \quad (3.13)$$

Die Wassermenge  $X_s m_L$  ist gasförmig von der trockenen Luft gespeichert. Die Kondensationsmenge  $\Delta X m_L$  setzt sich nun an Keimpunkten in der Umgebung ab oder wird als Nebel aus der Gasphase ausgeschieden. Keimzellen für Wassertropfen können zum Beispiel Verunreinigungen oder raue Oberflächen sein. Das höchste treibende Potential für eine solche Keimzelle hat der kälteste Punkt im System. In unserem Anwendungsfall ist das der Wärmeübertrager des Verdampfers. Da der Verdampfer zur Bereitstellung der Kälteleistung und einer funktionierenden Wärmeübertragung stets eine Temperaturdifferenz zwischen dem Kältemittel und der vorbei strömenden Luft bereitstellt, bilden sich hier die ersten Tropfen. Je nach ursprünglicher Beladung der Luft bilden sich die Tropfen eher am Anfang oder Ende des Wärmeübertrager. War die feuchte Luft schon vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager bereits stark gesättigt, bilden sich Tropfen am Eingang der Lamellen. [Baehr, 2013]

### 3.2.2 Reif- und Eisbildung

Liegt die Oberflächentemperatur auf dem Wärmeübertrager des Verdampfers nicht nur unter dem Taupunkt der feuchten Luft sondern auch unter dem Gefrierpunkt, kann es zum Gefrieren der kondensierten Tropfen und/oder zur Desublimation von Wasserpartikel auf der Oberfläche kommen. Dieser Abschnitt soll einen Überblick über diese zwei thermodynamischen Phänomene geben. Da in dieser Arbeit nicht der Reifbildungsprozess im Hauptfokus steht, sondern der technische Aspekt der Abtauung, wird der Eisbildungsprozess hier nur kurz erläutert.

In der Literatur gibt es zahlreiche Quellen, die sich mit der Reif- bzw. Eisbildung auseinander setzen. Die Quellen beschreiben den Kristallbildungsprozess sowohl aus der rein theoretisch Sicht als auch simulationsrelevanten und technischen Überlegungen und Untersuchungen. Der scheinbar triviale Prozess von der Bildung eines Eiskristalles auf einer Oberfläche und sein weiteres Wachstumsverhalten ist sehr komplex und Gegenstand zahlreicher aktueller und schon abgeschlossener Forschungsprojekten.

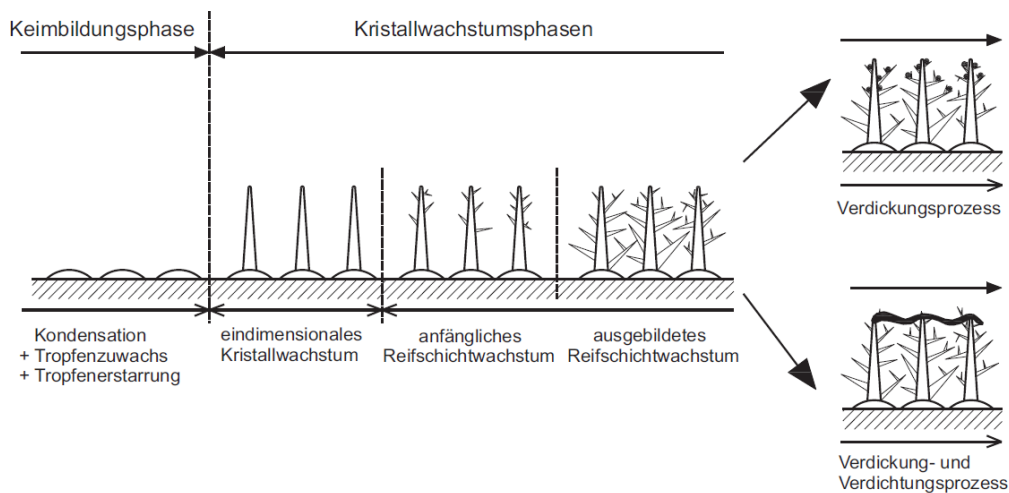
Neben den theoretischen Grundlagen wird in der Arbeit von SCHYDLO ein Simulationsmodell für den Reifbildungs- und Abtauprozess auf einem Rohr entwickelt. Zudem sind bisherigen Arbeiten zu der Thematik in [Schydlo, 2010] aufgelistet und zusammengefasst. Praktische Untersuchungen sowie Versuchsaufbauten zum Thema der Vereisung von Luftkühler werden in HILFIKER und K. KOSOWSKI beschrieben. In den Arbeiten wurden die Vereisungs- und innovative Abtauungsprozesse von einer CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe, die zur Heizung von Passivhäuser eingesetzt wird, untersucht.

Es gibt zahlreiche Einflussgrößen die auf den Prozess und die Form des Eiskristalls und späteren Reif einwirken. Die wichtigsten Einflussgrößen sind die Luftgeschwindigkeit, die Lufttemperatur, die

Luftfeuchte, die Oberflächentemperatur und die Zeit. Um eine den Reif charakterisieren zu können, werden folgende Größen zur Hilfe genommen die Reifdicke, die Reifdichte, die Porösität und die Wärmeleitfähigkeit.

In der Arbeit von ? aus dem Jahre 1977 wird der Eiskristallwachstum in drei Phasen unterteilt:

1. Eindimensionales Kristallwachstum
2. Reifschichtwachstumsphase
3. Vergletscherung.



**Abbildung 3.5:** Kristallwachstum auf einer ebenen Oberfläche [Schydlo, 2010]

In Abbildung 3.5 sind die drei Kristallwachstums-Phasen nach ? sowie die vorhergehende Keimbildungsphase, , eingeführt in [Hilfiker, 2004], dargestellt.

### Keimbildungsphase

In der Keimbildungsphase bilden sich zunächst Wassertropfen auf der Lamellenoberfläche, die trotz Temperaturen kleiner als der Gefrierpunkt nicht erstarren, sondern wachsen zu größeren Tropfen an. Je kleiner die Unterkühlung desto größer werden die Tropfen bevor sie erstarren und in die erste Kristallwachstumsphase übergehen.

### Eindimensionales Kristallwachstum

Die erste Phase ist gekennzeichnet durch Kristallwachstum senkrecht zur Oberfläche und mit einheitlicher Wachstumsgeschwindigkeit. Dies führt zu einer erhöhten Rauigkeit aufgrund der sich stetig vermehrenden Kristalle.

### Reifschichtwachstumsphase

In der zweiten Phase beginnt das dreidimensionale Wachstum. Die Kristalle fangen an sich miteinander zu verästeln. Ein poröses Kristallgitter entsteht. Aufgrund des Wärmeleitwiderstandes, der mit der Reifdicke steigt, erhöht sich die Oberflächentemperatur der Reifschicht. Desweiteren kommt es zu einem Massenstrom innerhalb der Reifschicht, ausgelöst durch Diffusion. Die Diffusion rührt aus den Konzentrationsunterschiede zwischen der Lamelle und der Reifoberfläche. Der Wassermassenstrom läuft in das poröse Kristallgitter und gefriert dort in Nähe der Lamelle. Die Dichte der Reifschicht steigt und mit ihr der Wärmewiderstand. Dies führt zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der Reifschicht und schließlich zur Überschreitung des Gefrierpunktes von Eis. Die Spitzen des Kristalle schmelzen und es bildet sich Kondensat. Die dritte Wachstumsphase beginnt.

### Vergletscherung

Das flüssige Wasser läuft aufgrund der Kapillarwirkung der Kristalle in die Zwischenräume des Kristallgitters und gefriert dort wieder. Die Kristallgitter werden dichter und kompakter. Dies führt zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit der Reifschicht. Es wird von einer Vergletscherung gesprochen. Die Oberflächentemperatur der Reifschicht sinkt erneut und fällt erneut unter den Gefrierpunkt. Nun kann die feuchte Luft erneut an der Oberfläche des Reifs desublimieren. Der Prozess wiederholt sich solange bis das Eis so kompakt ist, dass kein weiteres Kondensat mehr in die Reifschicht eindringen kann.

### 3.3 Morphologie von Eiskristallen

## Literaturverzeichnis

- [Baehr 2013] BAEHR, Hans D.: *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978–3–662–10518–4
- [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 2010] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (BMWi): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. (2010). <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiekonzept-2010,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- [Danfoss GmbH 2006] DANFOSS GMBH: *Kältetechnik-Einführung in die Grundlagen*. Version: Juni 2006. <http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/EC23F2C0-8831-4187-843F-580012B3E0BE/0/PF000F103.pdf>
- [EnergieAgentur.NRW 2010] ENERGIEAGENTUR.NRW: Kälteerzeugung Potenziale zur Energieeinsparung. (2010). [http://www.energieagentur.nrw/content/anlagen/qb\\_kaelteerzeugung\\_final.pdf](http://www.energieagentur.nrw/content/anlagen/qb_kaelteerzeugung_final.pdf)
- [Freitag 2015] FREITAG, H.: Experimentelle Kältetechnik am EBC: Der Abtau-Prüfstand, 2015
- [Grote u. Feldhusen 2014] GROTE, Karl-Heinrich ; FELDHUSEN, Jörg: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24. Aufl. Berlin Heidelberg New York, 2014. – M7–M15 S. ISBN 978–3–642–38891–0
- [Helmlinger 2015] HELMLINGER, Michael: *Untersuchung von Energieeffizienz steigernden Maßnahmen bei der Abtauung von Luftkühlern mithilfe eines selbstentwickelten Messsystems*, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, RWTH Aachen University, Diplomarbeit, November 2015
- [Hilfiker 2004] HILFIKER, Rasid Sahinagic; Martin Imholz; Louis Berlinger; Heinrich Huber; K.: *LOREF: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Untersuchung der Frostbildung für Lamellenluftkühler von Wärmepumpen*. <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000008172.pdf&name=240120.pdf>. Version: 2004
- [K. Kosowski 2009] K. KOSOWSKI, L. K. W. Tegethoff T. W. Tegethoff: CO<sub>2</sub>- Wärmepumpe für Passivhäuser / Institut für Thermodynamik, TU Braunschweig. 2009. – Forschungsbericht
- [M.Stöckner 2012] M.STÖCKNER: *Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft . Forschung aktuell 2012*. [https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/page/downloads/hs\\_karlsruhe\\_forschung\\_aktuell\\_2012.pdf](https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/page/downloads/hs_karlsruhe_forschung_aktuell_2012.pdf). Version: 2012



- [Pehnt et al. 2011] PEHNT ET AL.: *Kurzzusammenfassung Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative*. 2011
- [Preuß 2011] PREUSS, G. ; VDMA (Hrsg.): *Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland: Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten*. 2011
- [Schydlo 2010] SCHYDLO, A.: *Reifbildung und -wachstum auf gekühlten Rohroberflächen*, Technischen Universität Darmstadt, Diss., März 2010. [http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2191/1/080610\\_Schydlo\\_PhD.pdf](http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2191/1/080610_Schydlo_PhD.pdf)
- [Siemens Schweiz AG 2007] SIEMENS SCHWEIZ AG: *Kältetechnik*. Version: Januar 2007. <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=8358>

# 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 zigmal 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 zignal 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 8. Juni 2016

Name hier bitte einfügen