

## Bachelorarbeit

# **Sperrvermerk** **Modellgestützte Untersuchung und experimentelle Validierung von Verdampferschaltungen zur thermischen Leistungssteigerung für den Einsatz in Kühlmöbeln**

Model-based investigation and experimental validation of evaporator interconnections for thermal performance enhancement for use in refrigerated display cabinets

Aachen, April 2018

**Tim Klebig**

Matrikelnummer: 335421

Betreuer:

Christian Vering, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Diese Arbeit wurde vorgelegt am:

E.ON Energy Research Center | ERC

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate | EBC

(Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik)

Mathieustraße 10, 52074 Aachen



## Kurzfassung

Zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs und zur Vermeidung unerwünschter Klimaauswirkungen ist es notwendig, CO<sub>2</sub>- sowie Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Im Rahmen der F-Gas-Verordnung der EU werden diese Ziele verfolgt. Mit einem Anteil von 14 % am Energiebedarf und etwa 5 % an direkten und indirekten Treibhausgasemissionen bietet die Kältetechnik in Deutschland hier ein großes Einsparpotential. Ein Umstieg von synthetischen (GWP hoch) auf natürliche Kältemittel (GWP niedrig) ist ein nachhaltiger Ansatzpunkt. Großes Potential als Ersatzkältemittel bietet Propan (R290) in Kältekreisen. Die maximale Füllmenge in Kältekreisen ist bzgl. Sicherheitsnormen auf 150 g beschränkt. Mit dem Ziel die Füllmenge eines Kältekreises zu verringern und gleichzeitig Kälteleistung zu maximieren, werden in einer Klimakammer experimentelle Untersuchungen unter konstanten Bedingungen und unter Veränderung günstiger Parameter sowie Komponenten durchgeführt. Im Rahmen der Bachelorarbeit werden Untersuchungen mit unterschiedlichen Motoren und Kältemittelölen durchgeführt. Vergleiche von Versuchsdaten sollen nach Norm ausgewertet werden und hinsichtlich des Systemverhaltens gegenübergestellt werden. Daraus können Veränderungspotentiale abgeleitet werden. Durch die Verschaltung der Verdampferrohre in einer modifizierten Reihenfolge wird ein vielversprechender Leistungsgewinn erzielt. Zur Kältekreisuntersuchung dieses Einflusses wird ein mathematisches Modell des Verdampfers entwickelt und anhand von Versuchsdaten validiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden dazu benutzt den optimalen Betriebspunkt der Anlage hinsichtlich Komponentenauswahl und Parameter zu identifizieren. Die Arbeit wird mit Zusammenfassung und Ausblick abgeschlossen.



## **Abstract**

It is necessary to reduce CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions in order to limit the global increase in temperature and to avoid undesirable effects on the climate. The EU's F-gas regulation pursues these objectives. With a share of 14 % of the electricity energy demand and about 5 % of direct and indirect greenhouse gas emissions, the refrigeration technology in Germany offers great saving potential here. Switching from synthetic (high GWP) to natural refrigerants (low GWP) is a sustainable starting point. There is great potential as a substitute refrigerant for propane (R290) in refrigeration circuits. The maximum capacity in cooling circuits is restricted to 150 g with regard to safety standards. With the aim of reducing the capacity of a refrigeration circuit and at the same time maximizing refrigeration capacity, experimental investigations under constant conditions and changing favorable parameters and components are carried out in a climate chamber. In the bachelor thesis investigations with different engines and refrigerant oils are carried out. Comparisons of test data should be evaluated according to the standard and compared with regard to the system behavior. From this, potential for change can be derived. By connecting the evaporator tubes in a modified order, a promising performance gain is achieved. For the refrigeration circuit investigation of this influence, a mathematical model of the evaporator is developed and validated on the basis of experimental data. The knowledge gained from this is used to identify the optimum operating point of the system with regard to component selection and parameters. The work is completed with summary and outlook.

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Vorwort	X
1 Motivation	1
2 Technik/Methoden	2
2.1 Das Kühlregal . . . . .	2
2.2 Die Klimakammer . . . . .	2
2.3 Erfassung von Messdaten . . . . .	4
2.3.1 Messdaten der Klimakammer . . . . .	4
2.3.2 Messdaten des Kühlregals . . . . .	5
2.3.3 Messdaten des Leistungsanalysators . . . . .	5
2.4 Testbedingungen nach Norm . . . . .	5
2.5 Simulationsmodell für Verschaltung der Verdampferrohre . . . . .	7
2.5.1 Modellierung mit EES . . . . .	8
2.5.2 Berechnung des Druckabfalls in der Zweiphasen-Strömung . . . . .	9
2.5.3 Berechnung des Wärmeübergangs . . . . .	11
2.5.4 Das Modell . . . . .	13
3 Versuchsdurchführung	15
3.1 Einstellung von Normbedingungen . . . . .	15
4 Analyse der Messergebnisse	16
5 Zusammenfassung	17
Literaturverzeichnis	18
A Wirklich wichtiger Anhang	20
A.1 Die Versalien . . . . .	20
B Wichtiger Anhang	22

# 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

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

### Indizes und Abkürzungen

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

Fortsetzung auf der nächsten Seite



## Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
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

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Kältekreise des Kühlmöbels . . . . .	3
2.2	Klimakammer . . . . .	4
2.3	Anordnung der M-Pakete und der Temperatursensoren [1] . . . . .	6
2.4	Messpunkte [1] . . . . .	7
2.5	Vergleich der Verdampferschaltungen . . . . .	8
2.6	Geometrie des Verdampferrohres . . . . .	12
2.7	Zellenmethode . . . . .	14

## Tabellenverzeichnis

2.1	Klimaklassen [1] . . . . .	6
2.2	Temperaturklassen der M-Pakete [1] . . . . .	7
3.1	Werte der Wärmeübergangs- und Wärmeleitzahlen . . . . .	15

## Vorwort

# 1 Motivation

Um den globalen Temperaturanstieg zu begrenzen und unerwünschte Klimaauswirkungen zu vermeiden ist es notwendig CO<sub>2</sub>- sowie Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Im Rahmen der F-Gas-Verordnung der EU werden diese Ziele verfolgt. Mit einem Anteil von 14 % am Elektronikenergiebedarf und etwa 5 % an direkten und indirekten Treibhausgasemissionen bietet die Kältetechnik in Deutschland großes Einsparpotential. Somit ist der Umstieg von synthetischen auf natürliche Kältemittel ein wichtiger Ansatzpunkt. Großes Potential als Ersatzkältemittel bietet der Einsatz von Propan (R290) in Kältekreisen, dessen maximale Füllmenge in Kältekreisen vor dem Hintergrund von Sicherheitsnormen auf 150 Gramm beschränkt ist.

Propan Umrüstung Reduzierung des inneren Volumens Emerson Prüfstand AHT Möbel zur Verbesserung der Kälteleistung Klimakammer Zusammenstellung eines Pakets an Komponenten Quellen: ECODESIGN EN1127

Mithilfe des Programms EES (Engineering Equation Solver) wurde im Rahmen der Untersuchungen ein Modell erstellt, welches es ermöglicht den Effekt einer anderen Verschaltung der kältemittelführenden Leitungen innerhalb des Verdampfers auf dessen Kälteleistung zu simulieren. Grundidee hinter dem Modell ist den, durch den hohen Kältemittelmassenstrom bei gleichzeitig geringem Durchmesser der Verdampferrohre bedingten, Druckabfall und das damit einhergehende Absinken der Sättigungstemperatur zu nutzen. Im Ausgangsmodell durchströmt das Kältemittel den Verdampfer im Gegenstromprinzip. Aufgrund des Druckabfalls verhält sich diese Anordnung wie eine Kombination aus Gleich- und Gegenstrom. Wird nun die Anordnung der Rohre dahingehend geändert, dass das Kältemittel den Verdampfer von dessen Mitte aus im Gleichstrom mit der Luft nach oben durchströmt, aber die überhitzten Rohrreihen noch immer beim Lufteintritt sind, so erzielt man den gegenteiligen Effekt: Der Wärmeübertrager bietet eine Kombination aus Gleich- und Gegenstrom, verhält sich aber wie ein reiner Gegenstromverdampfer. Hierbei ist am Verdampferaustritt der Luft eine höhere Temperaturdifferenz zum Kältemittel zu erwarten. Das Modell soll zeigen ob diese Maßnahme einen bedeutenden Effekt erzielen kann und wird anschließend im Versuch validiert.

## 2 Technik/Methoden

### 2.1 Das Kühlregal

Der Mittelpunkt der durchgeführten Untersuchungen ist ein vertikales Verkaufskühlmöbel der Firma AHT. Es umfasst auf einer Länge von 3,75 m vier Regalböden um Produkte zu kühlen und auszustellen. Ein von oben herabfallender Luftschleier ermöglicht ein türloses Design des Regals. Die Kälteerzeugung wird, wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, durch drei separate Kältekreisläufe gewährleistet. Das verwendete Kältemittel ist Propan (R290). Jeder Kreis besitzt eine Füllmenge von 150 g. Um die Füllmenge zu reduzieren wurden bereits vor Beginn der Untersuchungen kältetechnische Komponenten mit geringerem internen Volumen eingebaut. Die Verdichter sind ein Produkt der Firma Emerson. Im Rahmen der Untersuchungen kommen mehrere Modelle zum Einsatz. Drei Plattenwärmeübertrager der Firma SWEP dienen als Verflüssiger. Sie besitzen je 20 Platten und eine Nennleistung von je 2,7 kW. Die Expansionsventile der Firma Alco sind elektronisch regelbar und besitzen einen Temperatur- sowie Drucksensor in der Saugleitung. Die drei Kreisläufe durchlaufen mit je sechs Durchgängen einen gemeinsamen Verdampfer dessen Lamellenabstand 5 mm beträgt. Sechs Lüftermotoren der Firma EBM Pabst saugen die Luft durch den Verdampfer mit einer konstanten Drehzahl von 1400  $U/min$ .

### 2.2 Die Klimakammer

Um während den Untersuchungen gleichbleibende Umgebungsbedingungen zu generieren und so reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, steht das Kühlregal in einer Klimakammer. Wie in Abbildung 2.2 zu erkennen besteht die Klimakammer eigentlich aus zwei kleineren Kammern mit eigenständigen Zuluftregelungen. Aufgrund der Größe des Regals wurde die Trennwand zwischen den Kammern entfernt. Die Zuluftaufbereitung übernimmt dabei die Klimaanlage der Kammer B. Damit die aufbereitete Luft den Raum über seine gesamte Länge durchströmt wurde die Ansaugöffnung von Kammer B mit einer Decke, die bis zum Ende des Raums reicht, abgedeckt. Vor den Luftauslassgittern besitzen die Kammern Umlenkbliche. Diese sollen eine gleichmäßige Verteilung des Luftmassenstroms über den Austrittsquerschnitt erzielen. Die Klimaanlage sind in der Lage die angesaugte Raumluft zu kühlen, aufzuheizen, sowie zu be- und entfeuchten. Die Regelung findet dabei über einen Computer statt. Mithilfe von LabView, welches eine intuitive Benutzeroberfläche bietet, lässt sich Einfluss auf die Soll-Werte, die Dauer der jeweiligen Untersuchung

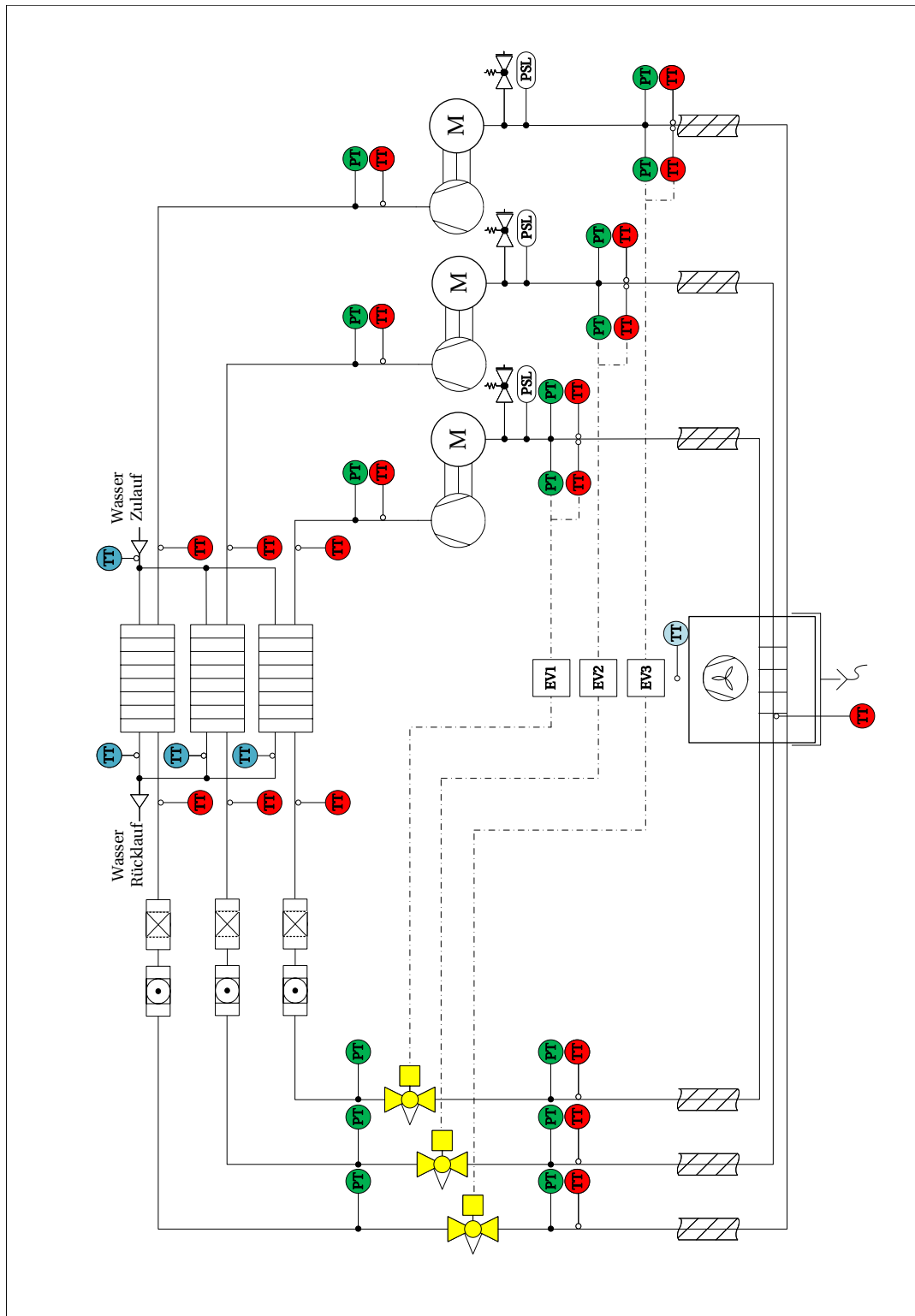
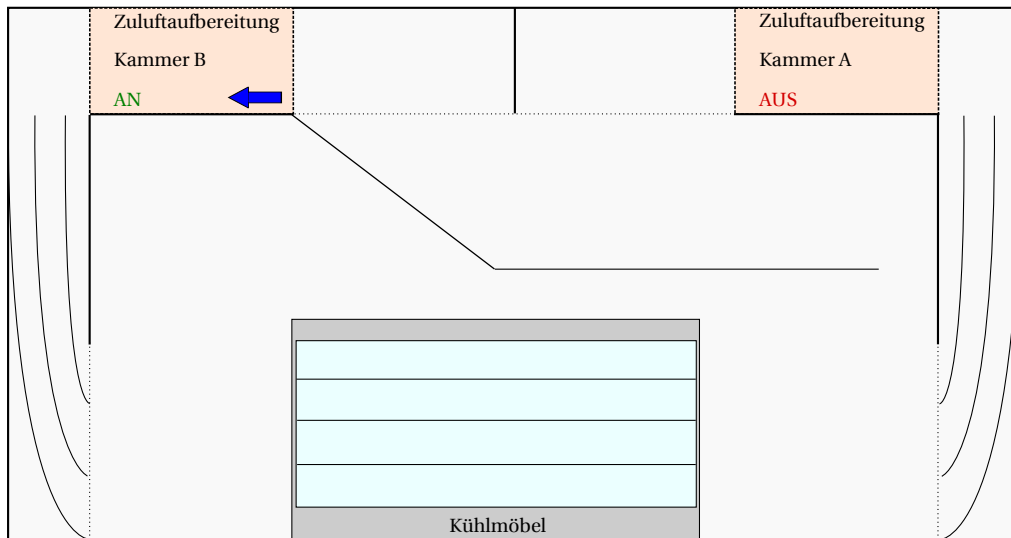


Abbildung 2.1: Kältekreise des Kühlmöbels

und die Einstellung der Regelparameter nehmen. Jede Kammer besitzt zudem einen Wasseranschluss dessen Vorlauftemperatur regulierbar ist. Die Verflüssiger des Kühlregals werden mit temperiertem Wasser der Regelung von Kammer A beaufschlagt.



**Abbildung 2.2:** Klimakammer

### 2.3 Erfassung von Messdaten

Um alle physikalischen Größen während des Betriebs möglichst genau zu erfassen und zu speichern werden entsprechende Geräte und Programme eingesetzt. Insgesamt finden drei Systeme Anwendung um sensorbasiert Daten zu erfassen, umzuwandeln und in Tabellenform zu speichern.

#### 2.3.1 Messdaten der Klimakammer

Die in Abschnitt 2.2 vorgestellte Klimakammer wird über LabView gesteuert. Die erfassten Messdaten sind raumluftseitig Ist- und Mittelwerte der Temperaturen sowie die relative Luftfeuchtigkeit. Wasserseitig werden Wassermassenstrom sowie Vor- und Rücklauftemperatur gemessen. Die Sensoren, welche die Regelgrößen Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit aufnehmen, sind zuluftseitig in der Nähe des Auslassgitters positioniert. Die Regelgröße der Temperatur entspricht dem Mittelwert von drei, über die Höhe des Luftauslassgitters verteilten Temperatursensoren. Wird der Betrieb der Klimakammer über das Programm gestartet so wird eine Exceldatei erstellt in die in einem Intervall von 1 s die erfassten Daten geschrieben werden.



### 2.3.2 Messdaten des Kühlregals

Mithilfe des Programms NI SignalExpress werden die Messdaten des Kühlregals und der Kältekreisläufe via Modbus erfasst. Um die Temperaturen zu messen werden Thermoelemente und um die Drücke zu messen Hochgenauigkeitsdruckaufnehmer verwendet. Die erfassten Messwerte sind die Produkttemperaturen sowie Ein- und Austrittstemperatur der Luft am Verdampfer des Kühlregals, die Temperaturen an verschiedenen Positionen der Kältekreisläufe und die Relativdrücke des Kältemittels im System in Heißgasleitung, Flüssigkeitsleitung, Einspritzleitung und Saugleitung. Die Positionen der Sensoren an den Kältekreisläufen sind aus Abbildung 2.1 ersichtlich. Zudem wurde noch die Temperatur des Kältemittels nach jedem einzelnen Durchgang durch den Verdampfer erfasst. In einem Intervall von 5 s werden die erfassten Daten in eine Exceltabelle geschrieben. SignalExpress erstellt in Echtzeit Graphen der Messwerte. Somit lässt sich das Verhalten des Systems jederzeit beobachten.

### 2.3.3 Messdaten des Leistungsanalysators

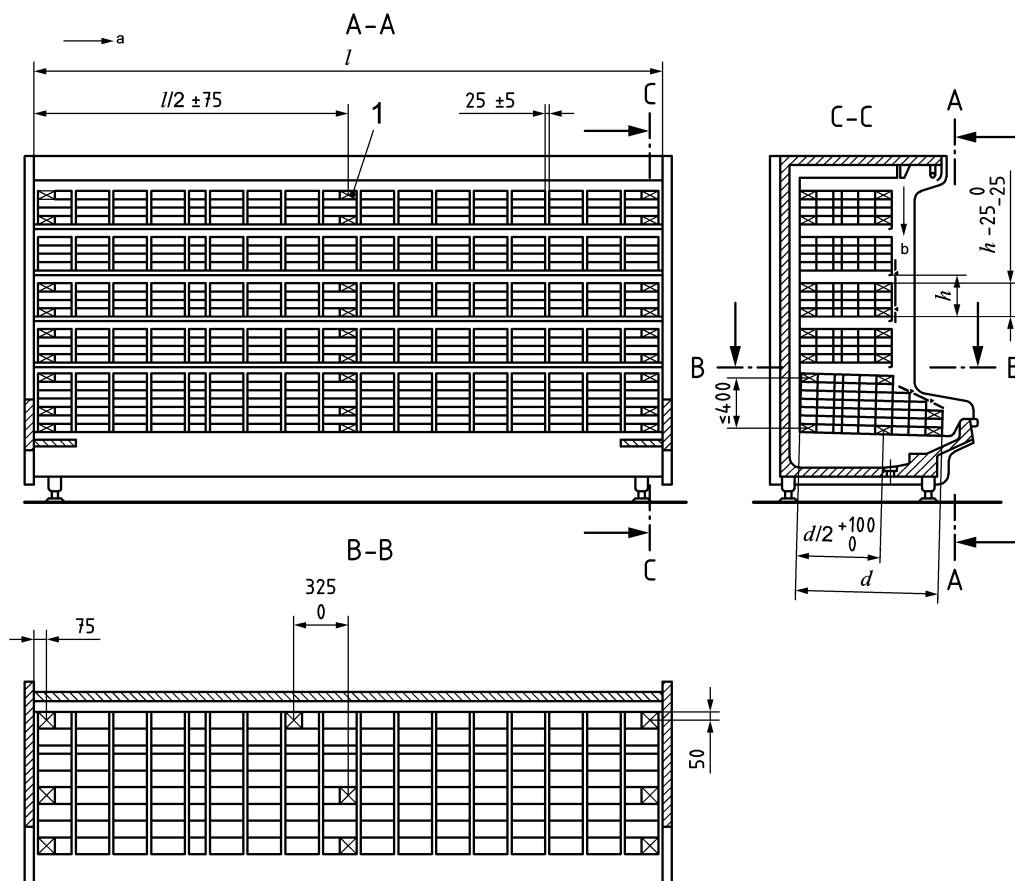
Um den Zustand des Systems auch elektroseitig zu erfassen wird ein Yokogawa WT3000 Leistungsanalysator verwendet. Dieser ist in der Lage Spannungen, Ströme mit einer Genauigkeit von 0,02 % zu erfassen und daraus Blind-, Wirk- und Scheinleistungen zu berechnen. Die abgenommenen Komponenten sind die einzelnen Verdichter, die Ventilatoren und die restlichen Verbraucher des Kühlregals, wie Licht und Relays. Das Gerät speichert die erfassten und berechneten Messwerte in Tabellenform auf einem externen Datenspeicher. Die Intervalllänge beträgt hierbei 5 s.

## 2.4 Testbedingungen nach Norm

Die Norm DIN EN ISO 23953-2 liefert Vorgaben zum Aufbau des Prüfstandes, zur Position der Messtechnik und zu Berechnungsmethoden. Bei allen Tätigkeiten wurde sich an dieser orientiert um reproduzierbare sowie vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Rahmenbedingung ist, dass alle Untersuchungen, nach Tabelle 2.1, bei Klimaklasse 3 durchgeführt werden. Die erzielten Produkttemperaturen des Kühlmöbels müssen dabei, gemäß Tabelle 2.2, zwischen 5 °C und -1 °C liegen. Um Kühlgut möglichst genau zu simulieren, werden je 1 kg schwere M-Pakete aus Silikon verwendet. Diese werden entsprechend Abbildung 2.3 positioniert und jene die mit einem X gekennzeichnet sind mit Temperatursensoren versehen. Der Messpunkt für die Temperatur und die relative Luftfeuchte muss mittig der Länge der Kühlmöbels und 300 mm vor dessen Oberkante liegen. Voraussetzung für eine normgerechte Messung ist zudem, dass eine Bewegung der Luft vorhanden ist. Deren Geschwindigkeit muss an den drei Messpunkten auf der Linie A-A in Abbildung 2.4 zwischen 0,1 m/s und 0,2 m/s liegen[1].

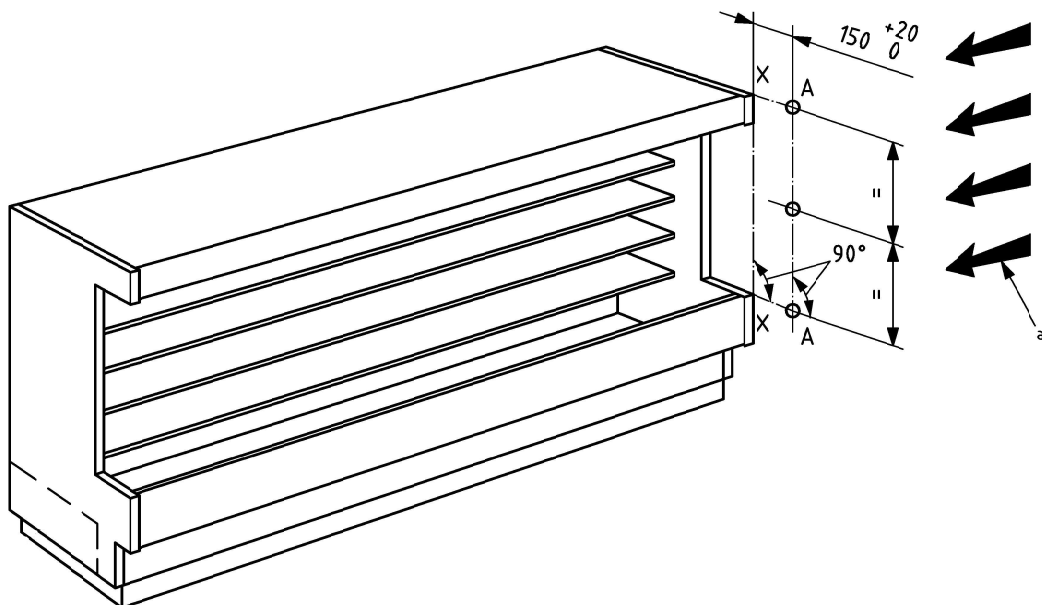
**Tabelle 2.1:** Klimaklassen [1]

Klimaklasse des Prüfraums	Trockenkugelt-temperatur	Relative Luftfeuchte	Taupunkt	Wasserdampf-gehalt in trockener Luft
		%	°C	g/kg
0	20	50	9,3	7,3
1	16	80	12,6	9,1
8	23,9	55	14,3	10,2
2	22	65	15,2	10,8
3	25	60	16,7	12
4	30	55	20	14,8
5	27	70	21,1	15,8
6	40	40	23,9	18,8
7	35	75	30	27,3


**Abbildung 2.3:** Anordnung der M-Pakete und der Temperatursensoren [1]

**Tabelle 2.2:** Temperaturklassen der M-Pakete [1]

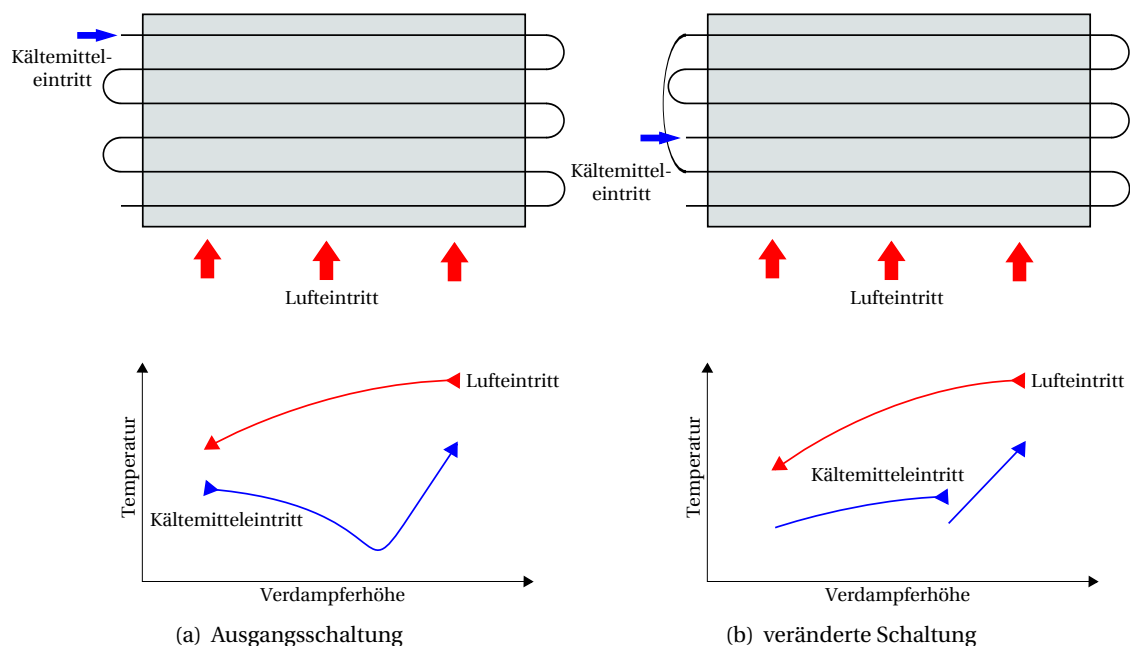
Klasse	Höchste Temperatur, des wärmsten M-Pakets gleich oder niedriger als	Niedrigste Temperatur, des kältesten M-Pakets gleich oder höher als
	°C	
L1	-15	-
L2	-12	-
L3	-12	-
M1	+5	-1
M2	+7	-1
H1	+10	+1
H2	+10	-1
S	Sonderklasse	


**Abbildung 2.4:** Messpunkte [1]

## 2.5 Simulationsmodell für Verschaltung der Verdampferrohre

Mithilfe des Programms EES (Engineering Equation Solver) wurde im Rahmen der Untersuchungen ein Modell erstellt, welches es ermöglicht den Effekt einer anderen Verschaltung der kältemittelführenden Leitungen innerhalb des Verdampfers auf dessen Kälteleistung zu simulieren. Grundidee hinter dem Modell ist den, durch den hohen Kältemittelmassenstrom bei gleichzeitig geringem Durchmesser der Verdampferrohre bedingten, Druckabfall und das damit einhergehende Absinken der Sättigungstemperatur zur Erhöhung der Kälteleistung zu nutzen. Im Ausgangsmodell

durchströmt das Kältemittel den Verdampfer im Gegenstromprinzip. Aufgrund des Druckabfalls verhält sich diese Anordnung wie eine Kombination aus Gleich- und Gegenstrom. Wird nun die Anordnung der Rohre dahingehend geändert, dass das Kältemittel den Verdampfer von dessen Mitte aus im Gleichstrom mit der Luft nach oben durchströmt, aber die überhitzten Rohrreihen noch immer beim Lufteintritt sind, so erzielt man den gegenteiligen Effekt: Der Wärmeübertrager bietet eine Kombination aus Gleich- und Gegenstrom, verhält sich aber wie ein reiner Gegenstromverdampfer. Hierbei ist am Verdampferaustritt der Luft eine höhere Temperaturdifferenz zum Kältemittel zu erwarten. Den Vergleich zeigt Abbildung 2.5. Das Modell soll zeigen ob diese Maßnahme einen bedeutenden Effekt erzielen kann und wird anschließend im Versuch validiert.



**Abbildung 2.5:** Vergleich der Verdampferschaltungen

### 2.5.1 Modellierung mit EES

EES ist ein Gleichungslöser, der es erlaubt Gleichungen mit Unbekannten unabhängig ihrer Reihenfolge effizient zu lösen. Zudem besitzt EES eine Vielfalt integrierter mathematischer, sowie thermodynamischer und physikalischer Funktionen auf die sich bequem zugreifen lässt[2]. Ausschlaggebend für den Entscheid über die Nutzung des Programms ist vorallem die integrierte Stoffdatenbank, welche den Zugriff auf die Daten einer Vielzahl von idealen sowie realen Fluiden erlaubt. Eine objektorientierte Modellierung ist leider nicht ohne Weiteres möglich, wodurch der Entwicklungsaufwand stark erhöht wird. Damit das Programm genaue Ergebnisse liefert ist es nötig, physikalisch sinnvolle und und möglichst genaue Begrenzungen der erstellten Variablen anzugeben. Weitere Programmfunktionen erlauben die Erstellung einer Benutzeroberfläche so-

wie die Erstellung von Tabellen und Graphen. Als sehr nützlich erweist sich dabei die Möglichkeit Stoff-Eigenschaftsdiagramme wie z.B. Mollier- oder log-p-h-Diagramme zu erstellen.

### 2.5.2 Berechnung des Druckabfalls in der Zweiphasen-Strömung

Die Ausgangsberechnung auf der alle weiteren Berechnung basieren, ist die des Druckabfalls innerhalb der Kältemittelströmung. Der gesamte Druckabfall setzt sich aus einem Reibungsanteil, einem Beschleunigungsanteil und einem statischen Anteil zusammen[3]:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{Reibung}} \pm \Delta p_{\text{statisch}} \pm \Delta p_{\text{Beschleunigung}} \quad (2.1)$$

Der statische Anteil, sowie der Beschleunigungsanteil sind von einer viel kleineren Dimension und werden deshalb als vernachlässigbar angenommen. Um den durch Reibung bedingten Druckabfall zu berechnen muss zunächst bestimmt werden ob die Gasphase dispers oder kontinuierlich ist, d.h. ob Gasblasen getrennt und verteilt in der Flüssigkeit transportiert werden oder zusammenhängend strömen.

$$\Delta p_{\text{Reibung}} = \int_{l_1}^{l_2} \left( \frac{dp}{dl} \right)_{\text{Reibung}} dl \quad (2.2)$$

Die Gasphase ist dispers, wenn gilt:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\dot{V}_G}{\dot{V}_L} = \frac{x \rho_F}{(1-x) \rho_D} \leq \frac{12\sqrt{Fr}}{1 + \frac{\sqrt{Fr}}{7}} \quad (2.3)$$

und als kontinuierlich, wenn gilt:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\dot{V}_G}{\dot{V}_L} = \frac{x \rho_F}{(1-x) \rho_D} > \frac{12\sqrt{Fr}}{1 + \frac{\sqrt{Fr}}{7}} \quad (2.4)$$

In allen durchgeführten Berechnungen ist die Dampfphase als kontinuierlich zu betrachten, daher wird sich im Rahmen dieser Ausführungen auf die Gleichungen dieser Annahme beschränkt. Der Reibungsdruckabfall wird wesentlich durch einen intensiven Impulsaustausch zwischen den beiden Phasen beeinflusst. In den Gleichungen wird die Zweiphasenströmung wie eine Dampfströmung behandelt und der Einfluss der flüssigen Phase durch eine Korrekturgröße  $\gamma$  berücksichtigt:

$$\left( \frac{dp}{dl} \right)_{\text{Reibung}} = \xi_D \frac{\dot{m}^2 x^2}{4 \rho_D} \left( \frac{1}{1-\gamma} \right)^2 \quad (2.5)$$

Dabei ist  $\xi_D$  der Reibungsbeiwert:

$$\frac{1}{\xi_D} = 2 \log(Re_D \sqrt{\xi_D}) - 0.8 \quad (2.6)$$

mit der Reynoldszahl der dampfförmigen Phase:

$$Re_D = \frac{\dot{m} x d}{\eta_D} \quad (2.7)$$

Die Korrekturgröße  $\gamma$  ist als effektive Querschnittsverengung für den Dampfstrom, verursacht durch die Flüssigkeit, zu interpretieren und kann als Versperrungsfaktor bezeichnet werden. Abhängig von den Geschwindigkeiten und den Dichteverhältnissen muss abschnittsweise zwischen verschiedenen Strömungsformen unterschieden werden. Bei kleinen Massenstromdichten ist die Strömung eben und geschichtet. Bei gesteigertem Durchsatz wird sie wellig und es treten Schwallen auf, durch die der Rohrumfang vollständig von Flüssigkeit benetzt ist. Bei noch höheren Durchsätzen wird die Flüssigkeit tropfenförmig im Gaskern mitgerissen. Durch erhebliche Expansionseffekte bei hohen Geschwindigkeiten findet eine Beschleunigung der Dampfphase statt und es stellt sich ein Schlupf zwischen den beiden Phasen ein[4].

$$\gamma = \gamma_F(1 - E) + \gamma_E E \quad (2.8)$$

Hierbei ist der Versperrungsfaktor für ebene Strömung:

$$\gamma_E = 1 - \left( 1 + 0.15 \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.45} \left( \frac{\eta_f}{\eta_D} - 1 \right)^{0.25} (1 + 3x^4) \right)^{-1} \quad (2.9)$$

der Versperrungsfaktor für Ringströmung mit Schwallen:

$$\gamma_F = 1 - \left( 1 + \frac{(1-x)\rho_D}{x\epsilon\rho_F} \right)^{-1.19} \quad (2.10)$$

und  $E$  ein Verteilparameter:

$$E = 1.857 + 0.815 \log \left[ \left( \frac{\dot{m} x}{\rho_D c_G} \right)^2 \left( 1 + \frac{4575 \rho_D^2}{\rho_F^2} \right) \right] \quad (2.11)$$

$E$  darf immer nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Liegt ein Ergebnis außerhalb dieses Bereichs wird  $E$  mithilfe einer Bedingung auf 0 bzw. 1 gesetzt. Bei  $E = 0$  ist die Strömungsform Ringschwallströmung, bei  $E = 1$  beschleunigte Strömung. Für die Berechnung von  $\gamma_F$  ist außerdem die Berechnung der Hilfsgrößen  $\epsilon$  und  $\psi$  nötig:

$$\epsilon^{-3} = \epsilon_1^{-3} + \epsilon_2^{-3} \quad (2.12)$$

mit

$$\epsilon_1 = 1.71\psi^{0.2} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.15} \left( \frac{\rho_D}{\rho_F} \right)^{0.5} \left( \frac{\eta_D}{\eta_F} \right)^{0.1} \quad (2.13)$$

und

$$\epsilon_2 = 9.1\psi \quad (2.14)$$

sowie

$$\psi = (Re_F Fr_F)^{-\frac{1}{6}} \left( \frac{1-x}{x} \right) \left( \frac{\rho_F}{\rho_D} \right)^{-0.9} \left( \frac{\eta_F}{\eta_D} \right)^{-0.5} \quad (2.15)$$

### 2.5.3 Berechnung des Wärmeübergangs

Die Ausgangsgröße der Temperatur von Luft und Kältemittel nach jeder Zelle wurde mittels der  $\epsilon - NTU$ -Methode berechnet[3][5][6].  $NTU$  (dt. Anzahl der Übertragungseinheiten) und  $\epsilon$  bezeichnen dimensionslose Kennzahlen. Diese Methode ist ein Verfahren, das oft bei der Auslegung von Wärmetauschern verwendet wird, da es teils schwierige Berechnungsschritte erspart. Zunächst ist es erforderlich die Wärmekapazitätsströme der beiden Fluide zu bestimmen. Für den Wärmekapazitätsstrom der Luft gilt:

$$\dot{C}_{min} = \dot{m}_h c_{p,h} \quad (2.16)$$

Für den Wärmekapazitätsstrom des Kältemittels gilt:

$$\dot{C}_{max} = \dot{m}_k c_{p,k} \quad (2.17)$$

Das Wärmekapazitätsverhältnis  $C_r$  ist damit:

$$C_r = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} \quad (2.18)$$

Zudem ist es notwendig den Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  zu berechnen[7]. Dieser setzt sich aus den Wärmeleitwiderständen der einzelnen Rohrschichten und Übergängen zusammen. Um flexibel bei der Anpassung der Parameter des Modells an die Realität zu sein wurde hierbei auf eine Analogie zu Widerständen in Reihenschaltung aus der Elektrotechnik zurückgegriffen und die wärmeübertragende Fläche  $A$  direkt mit einbezogen. Somit ist:

$$UA = \frac{1}{R_L + R_{Al} + R_{Cu} + R_{Km}} \quad (2.19)$$

samt der einzelnen Wärmeleitwiderstände:

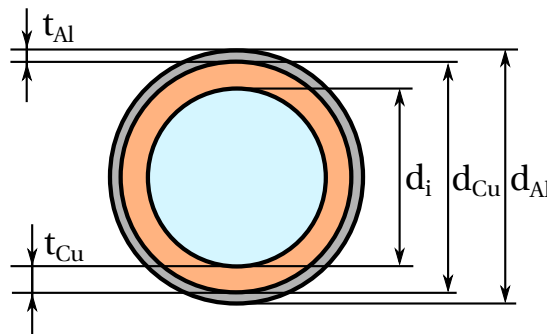
$$R_L = \frac{1}{\alpha_L d_{Al} \pi l} \quad (2.20)$$

$$R_{Al} = \frac{t_{Al}}{\lambda_{Al} d_{Al} \pi l} \quad (2.21)$$

$$R_{Cu} = \frac{t_{Cu}}{\lambda_{Cu} d_{Cu} \pi l} \quad (2.22)$$

$$R_{Km} = \frac{1}{\alpha_{Km} d_i \pi l} \quad (2.23)$$

Die Rohrgeometrie ist dabei wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Wärmeübergangszahlen wurden mit Orientierung am realen Modell bestimmt. Näheres dazu in Kapitel ??.



**Abbildung 2.6:** Geometrie des Verdampferrohres

Mit diesen Größen lässt sich nun der  $NTU$ -Wert berechnen:

$$NTU = \frac{UA}{\dot{C}_{min}} \quad (2.24)$$

Damit lässt sich nun die Effektivität des Wärmeübertragers  $\epsilon$  bestimmen. Dabei muss zwischen sensibler und latenter Wärmeaufnahme des Fluids unterschieden werden. Findet ein Verdampfungsprozess statt so gilt  $C_{max} \rightarrow \infty$  und damit  $C_r = 0$ . Für diesen Fall gilt:

$$\epsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (2.25)$$



Für den Fall überhitzenden Kältemittels und reinem Kreuzstrom gilt:

$$\epsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_r}\right)(NTU)^{0.22}(\exp[-C_r(NTU)^{0.78}] - 1)\right] \quad (2.26)$$

Mit diesen Größen ist es nun möglich den übertragenen Wärmestrom zu berechnen:

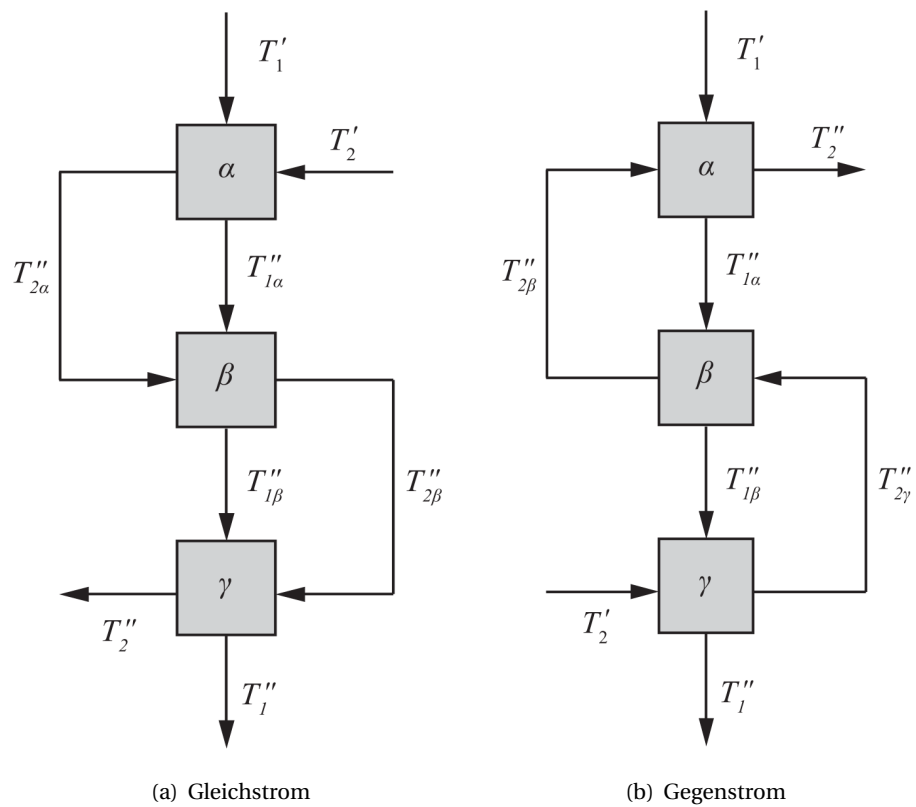
$$\dot{Q} = \epsilon \dot{C}_{min}(T_{L, \text{ein}} - T_{Km, \text{ein}}) \quad (2.27)$$

Hierbei ist die Eintrittstemperatur des Kältemittels die Sättigungstemperatur bei Eingangsdruck. Aus der Energiebilanz lassen sich dann Kältemittelaustrittsenthalpie sowie Luftaustrittstemperatur bestimmen:

$$\dot{Q} = \dot{M}_{Km}(h_{Km, \text{ein}} - h_{Km, \text{aus}}) = \dot{M}_L c_{p,L}(T_{L, \text{ein}} - T_{L, \text{aus}}) \quad (2.28)$$

#### 2.5.4 Das Modell

Mithilfe der in Abschnitt 2.5.2 und 2.5.3 vorgestellten Gleichungssysteme lassen sich, durch Angabe der Eingangswerte Druck, Dampfanteil, Temperatur und Massenstrom des Kältemittels sowie Temperatur und Massenstrom der Luft, Ausgangswerte nach einer definierten Rohrlänge berechnen. Da die Ergebnisse innerhalb einer Zelle allein von den Eingangswerten abhängig sind bietet eine Unterteilung in mehrere kleine Zellen eine viel höhere Genauigkeit. Um Rechenaufwand und Genauigkeit in der Waage zu halten und mit Orientierung am realen Verdampfer wird das Modell entsprechend der Anzahl der Verdampferrohre eines Kältemittelkreises mittels der Zellenmethode in sechs Berechnungszellen unterteilt[8]. Über die Benutzeroberfläche lässt sich der Zustand beider Fluide nach jeder einzelnen Zelle observieren und somit direkt mit den Daten des realen Verdampfers vergleichen. Das Modell ist nur gültig für die Annahme trockener Luft. Da auch in einer Klimakammer 0 % relative Feuchtigkeit schwierig zu erreichen sind, ist eine Abweichung der Ergebnisse zu erwarten.



**Abbildung 2.7:** Zellenmethode

### 3 Versuchsdurchführung

#### 3.1 Einstellung von Normbedingungen

Aus den Versuchsdaten ist ersichtlich, dass nur die letzte Rohrstrecke überhitzt ist.

**Tabelle 3.1:** Werte der Wärmeübergangs- und Wärmeleitzahlen

Parameter	Wert	Einheit
$\alpha_L$	292	$\frac{W}{m^2 K}$
$\alpha_{Km}$	50000	$\frac{W}{m^2 K}$
$\alpha_{Km,SH}$	29	$\frac{W}{m^2 K}$
$\lambda_{Cu}$	380	$\frac{W}{m K}$
$\lambda_{Al}$	220	$\frac{W}{m K}$

## **4 Analyse der Messergebnisse**

## 5 Zusammenfassung

Verweis auf Sektion: (siehe ??)

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Verkaufskühlmöbel – Teil 2: Klassifizierung, Anforderungen und Prüfbedingungen.
- [2] S. A. Klein. EES Manual, 2000.
- [3] Springer-Verlag GmbH. *VDI-Wärmeatlas*. 2013.
- [4] Bernt Kesper and Jogindar Mohan Chawla. Reibungsdruckabfall bei adiabater Zweiphasen-Flüssigkeits-Dampf-Strömung hoher Geschwindigkeit. *Forschung im Ingenieurwesen*, 42(6):177–183, 1976.
- [5] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. Dewitt, and T. L. Bergman. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, Hoboken NJ, 7th ed. edition, 2011.
- [6] Gregory Nellis and Sanford A. Klein. *Heat transfer*. Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2009.
- [7] Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung. Wärme- und Stoffübertragung I/II.
- [8] Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung. Wärmeübertrager und Dampferzeuger.

# Anhang

## A Wirklich wichtiger Anhang

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 zimal umgeschrieben worden und alles, was von ihrem Ursprung noch übrig wäre, sei das Wort ünd"

## B 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, Jancka 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 16. März 2018

DEIN NAME