

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

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Vorwort	X
1 Motivation	1
2 Technik/Methoden	3
2.1 Das Kühlregal	3
2.2 Die Klimakammer	3
2.3 Erfassung von Messdaten	5
2.3.1 Messdaten der Klimakammer	5
2.3.2 Messdaten des Kühlregals	6
2.3.3 Messdaten des Leistungsanalysators	6
2.4 Testbedingungen nach Norm	6
3 Prüfstand	9
4 Versuchsdurchführung	10
5 Analyse der Messergebnisse	11
6 Zusammenfassung	12
Literaturverzeichnis	13
A Wirklich wichtiger Anhang	15
A.1 Die Versalien	15
B Wichtiger Anhang	17

Nomenklatur

Formelzeichen und Einheiten

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

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
η_C	Carnot-Wirkungsgrad	—
κ_E	exergetische Aufwandszahl der Wärmeerzeugung	—
κ_T	exergetische Aufwandszahl des Wärmetransfers	—
Φ	thermische Leistung	W
ρ	Massendichte	kg/m ³
σ	Temperaturspreizung	K
ϑ	Temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K

Indizes und Abkürzungen

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

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
Δt	Zeitschritt der Länge Δt
t	technisch
V	Vorlauf
V	Verlust (Exergieanalyse)
W	Wärmeträgermedium

Abbildungsverzeichnis

1.1	RWTH-Aachen-Logo	2
2.1	IDC150	4
2.2	Klimakammer	5
2.3	Messpunkte	8

Tabellenverzeichnis

1.1	Das ist eine Testtabelle	1
2.1	Klimaklassen	7
2.2	Temperaturklassen der M-Pakete	7

Vorwort

1 Motivation

Um den globalen Temperaturanstieg zu begrenzen und unerwünschte Klimaauswirkungen zu vermeiden ist es notwendig CO2- sowie Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Im Rahmen der F-Gas-Verordnung der EU werden diese Ziele verfolgt. Mit einem Anteil von 14 % am Elektronenenergiebedarf 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

Grafiken: Klimakammer Inkscape Quellen: DIN EN ISO 23953

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta \tag{1.1}$$

Reference to figure 1.1

Tabelle 1.1: Das ist eine Testtabelle

Linke Spalte	Rechte Spalte
oben links	oben rechts
unten links	unten rechts



Abbildung 1.1: RWTH-Aachen-Logo

2 Technik/Methoden

2.1 Das Kühlregal

Der Mittelpunkt der durchgeführten Untersuchungen ist ein Kühlregal 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 Umlenkbleche. 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

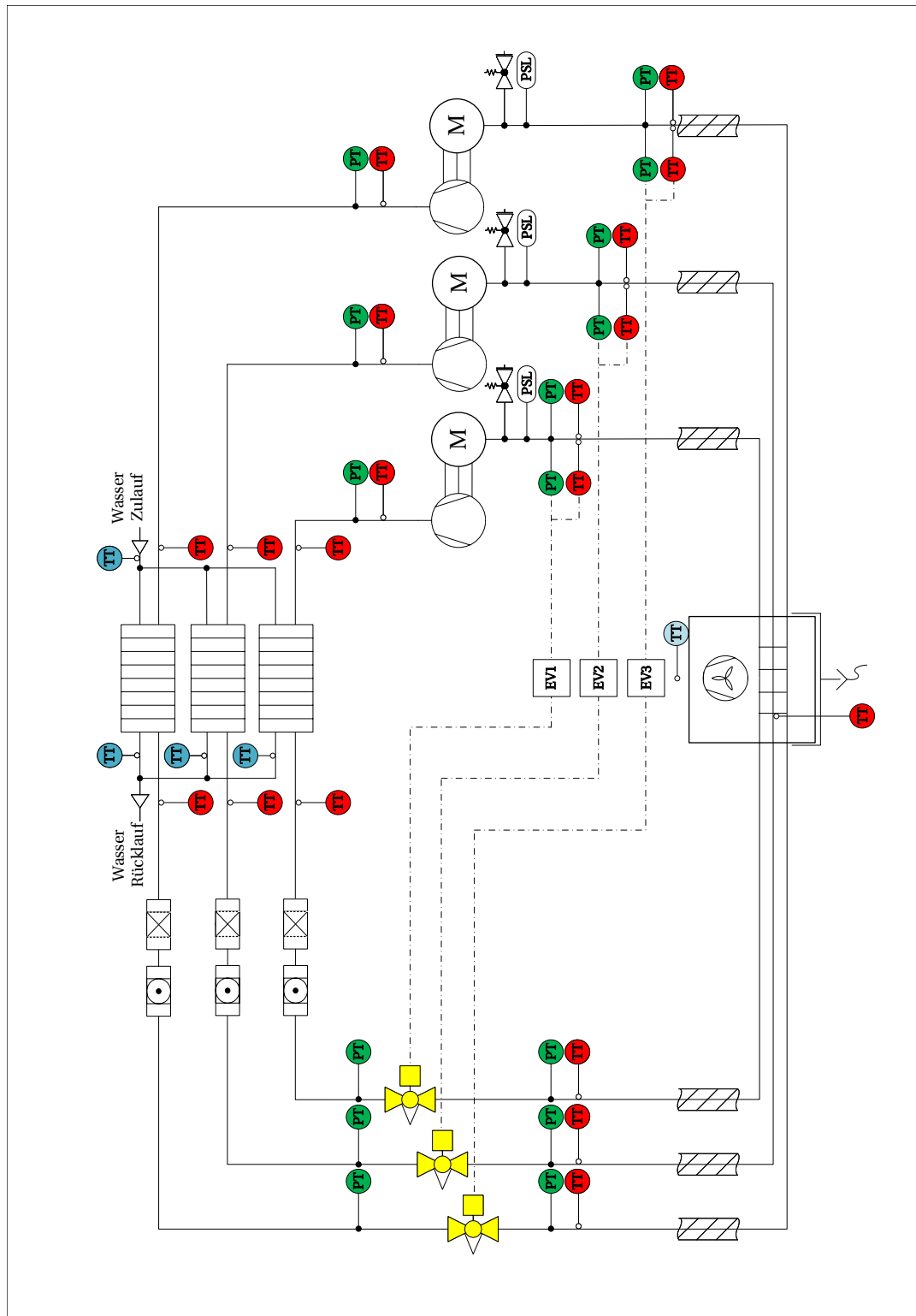


Abbildung 2.1: IDC150

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.

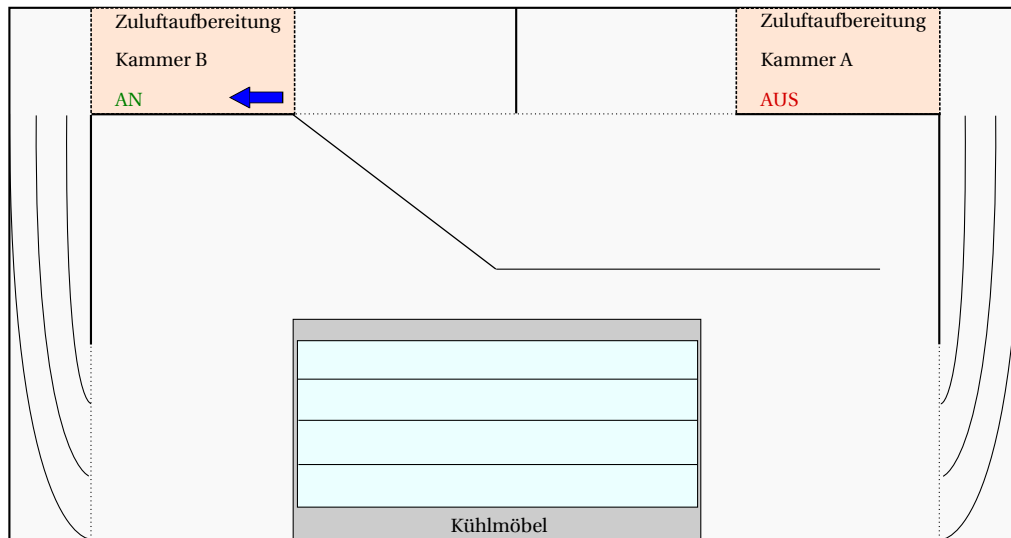


Abbildung 2.2: Klimakammer

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 raumlufseitig 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

joooooooo [1]

Tabelle 2.1: Klimaklassen

Klimaklasse des Prüfraums	Trockenkugeltemperatur	Relative Luftfeuchte	Taupunkt	Wasserdampfgehalt 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

Tabelle 2.2: Temperaturklassen der M-Pakete

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	

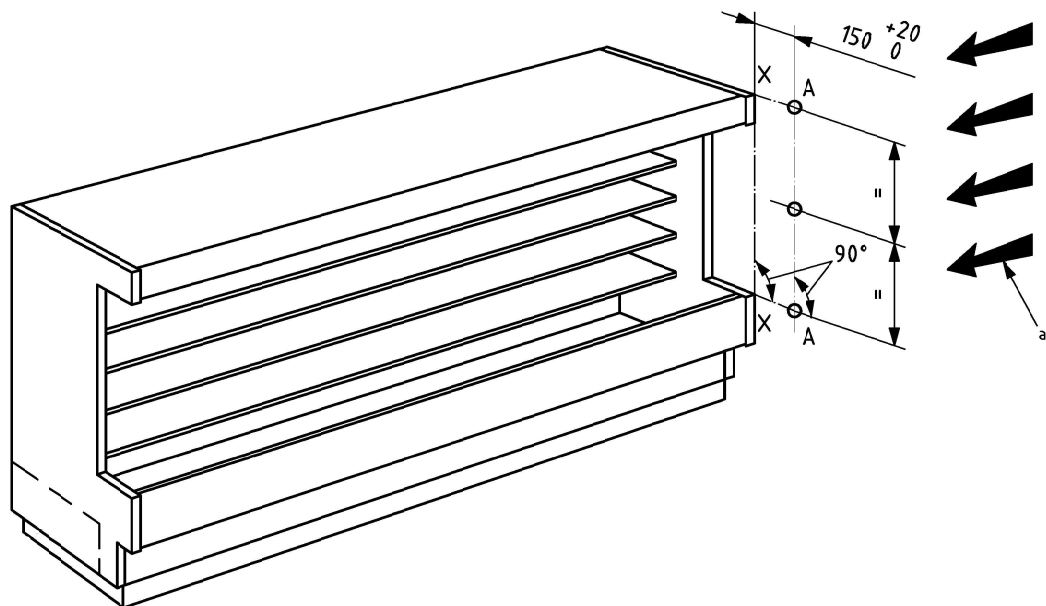


Abbildung 2.3: Messpunkte

3 Prüfstand

Grafiken: Klimakammer Inkscape Quellen: DIN EN ISO 23953

4 Versuchsdurchführung

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

5 Analyse der Messergebnisse

6 Zusammenfassung

Verweis auf Sektion: (siehe ??)

Literaturverzeichnis

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Verkaufskühlmöbel – teil 2: Klassifizierung, anforderungen und prüfbedingungen.

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 zigmal 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 13. März 2018

DEIN NAME