

Bachelorarbeit

Ermittlung optimierter Gebäudeenergiesysteme für den deutschen Wohngebäudebestand unter besonderer Berücksichtigung von Lüftungsverlusten

Determination of optimized building energy systems for the German residential building stock with special consideration of ventilation losses

Aachen, Mai 2019

Jonas Baumgärtner

Matrikelnummer: 330575

Betreuer:

Sebastian Remy, 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 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Deutscher Wohngebäudebestand	2
2.2 Historische Entwicklung der Dämmstandards	4
2.3 Sanierungsstand des deutschen Wohngebäudebestandes	5
2.4 Optimierungsmodell	5
3 Stand der Forschung	6
3.1 Motivation	6
3.2 Aufgabenstellung	6
Literaturverzeichnis	7
A Wirklich wichtiger Anhang	9
A.1 Die Versalien	9
B Wichtiger Anhang	11

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

2.1	errichtete Wohngebäude nach Mikrozensus-Klassen [2]	3
2.2	Anzahl an Wohneinheiten bei Einfamilienhäuser (SFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) [3]	4
2.3	tba	5

Tabellenverzeichnis

Vorwort

1 Einleitung

1.1 Motivation

das ist die einleitung

1.2 Aufgabenstellung

das ist die aufgabenstellung

2 Grundlagen

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung optimierter Gebäudeenergiesysteme für den deutschen Wohngebäudebestand. Hierzu wurde in Kapitel 2.1 der Bestand analysiert, um auf dieser Untersuchung aufbauend die nationale Wohngebäudesituation in einigen wenigen, repräsentativen Klassen abzubilden. Des Weiteren wurde in 2.2 die historische Entwicklung der deutschen Dämmstandards betrachtet. Daraus wurden Zeiträume der Baualtersklassen mit ähnlichen Wärmeübergangskoeffizienten der Gebäudehülle zusammengefasst. Zuletzt stellt Kapitel 2.3 die Grundlagen der mathematischen Optimierung sowie das im Rahmen dieser Arbeit erweiterte Optimierungsprogramm vor.

Die Gebäudeklassen sollen für die Bestimmung der Gebäudeenergiesysteme mit dem Optimierungsprogramm benutzt werden. Hieraus soll ein Vergleich zwischen Emissionsoptimum sowie Kostenoptimum gewonnen werden.

2.1 Deutscher Wohngebäudebestand

Zunächst wurde der Wohngebäudebestand hinsichtlich Alter und Größe ausgewertet. Als Daten wurden die Statistiken des Zensus2011, einer nationalen statistischen Erhebung von privaten Haushalten, betrachtet. Besagte Statistiken wurden in verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen des Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) ausgewertet und evaluiert. Weiterhin wurde für die gebäudetypischen Kennwerte die Typgebäude des europaweiten TABULA Projekts berücksichtigt.

Nach den 2011 veröffentlichten Zensus Daten besteht der deutsche Wohngebäudebestand aus rund 18.368.000 Gebäuden mit 39.432.000 Wohnungen [1]. Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, prägt den deutschen Wohngebäudebestand einen Boom in der Nachkriegszeit. So wurden in den Jahren von 1949 bis 1978 etwa 7,2 Millionen Häuser errichtet. Diese Klasse alleine macht 38 % der deutschen Wohngebäude aus. Mit ca. 2,7 Millionen Gebäuden und einem Anteil von etwa 14 % bilden die vor 1919 fertiggestellten Wohnobjekte den zweitgrößten Anteil, sowie die Häuser mit Baualter zwischen 1919 und 1948 mit knapp 12 % die drittgrößte Gruppe. Folglich sind knapp zwei Drittel der deutschen Wohngebäude vor 1978 erbaut worden.

Eine weitere relevante Klasse beschreiben mit fast 10 % die von 1979 bis 1986 geschaffenen Wohnbauten. Zusammen mit den drei Klassen 1987 - 1990, 1991 - 1995 und 1996 - 2000 werden durch diese vier Gruppen mehr als ein Viertel des Wohngebäudebestandes in Deutschland abgebildet.

Im Gegensatz zu den zuvor genannten Gruppen stellen die nach der Jahrtausendwende konstruierten Häuser mit unter 10 % und nur 1,6 Millionen Häusern einen relativ kleinen Anteil des nationalen Bestandes dar.

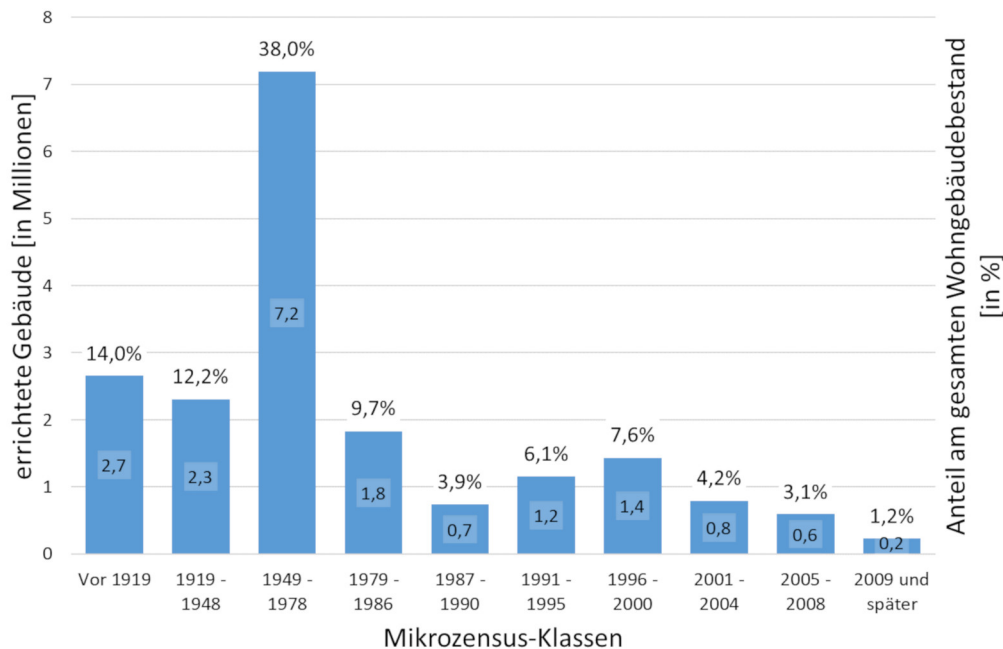


Abbildung 2.1: errichtete Wohngebäude nach Mikrozensus-Klassen [2]

Es sei noch zu erwähnen, dass in dieser Betrachtung den Mikrozensus-Klassen gefolgt wurde. Diese sind explizit keine gleich langen Zeitintervalle, sondern „orientieren sich an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und den Veränderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften“ [1]. So beschreibt beispielsweise das relativ kurze Zeitintervall von 1979 bis 1983 den Zeitraum zwischen erster und zweiter Wärmeschutzverordnung, auf welche in Kapitel 2.2 noch näher eingegangen wird.

Eine weitere Unterteilung des Wohngebäudebestandes erhält man bei der Betrachtung der Anzahl an Wohneinheiten im Gebäude. Hierbei setzt sich der Bestand zu zwei Dritteln aus Wohngebäuden mit nur einer Wohnung zusammen. Weitere 17 % bilden Gebäude mit zwei Wohnungen und die Klasse der Gebäude mit 3 - 6 Wohnungen stellen 12 %. Die größeren Gebäude mit 7 - 12 Wohnungen sowie mit 13 und mehr Wohnungen sind anteilig am Gebäudebestand mit jeweils 5 % und 1 % relativ kleine Gruppen. Allerdings gelten letztere nur bei einer Gebäudebetrachtung als weniger relevant, da sie bei einer Anschauung der Wohneinheiten logischerweise mit größeren Faktoren eingehen. [3]

In Abbildung 2.2 sind die Anzahl der Wohneinheiten für die drei Baualter-Klassen älter als 1978, 1979 - 1994 und 1995 - 2009 sowie deren Anteil an allen Wohneinheiten bis Baujahr 2009 des Ge-

bäudebestandes dargestellt. In Anlehnung an den vorherigen Abschnitt werden Gebäude mit bis zu 2 Wohnungen als Einfamilienhäuser zusammengefasst und nach der Englischen Bezeichnung „single family home“ mit SFH abgekürzt. Wohngebäude mit 3 oder mehr Wohnungen werden als Mehrfamilienhäuser mit der Abkürzung MFH für „multy family home“ gebündelt.

Auffallend ist wiederum der enorme Anteil der Gebäude mit Baualter älter als 1978. Hier zählen die Mehrfamilienhäusern mit 14,8 Millionen Wohnungen und einem Anteil aller bis 2009 errichteten Wohneinheiten von 38 % zur größten Gruppe. Mit 12,5 Millionen Wohnungen und einem Anteil von 32 % entfällt die zweitgrößte Klasse auf die Einfamilienhäuser mit Baujahr älter 1978. Ähnlich wie zuvor bei der Gebäudebetrachtung sind somit auch mehr als zwei Drittel aller Wohnungen vor 1978 erbaut worden.

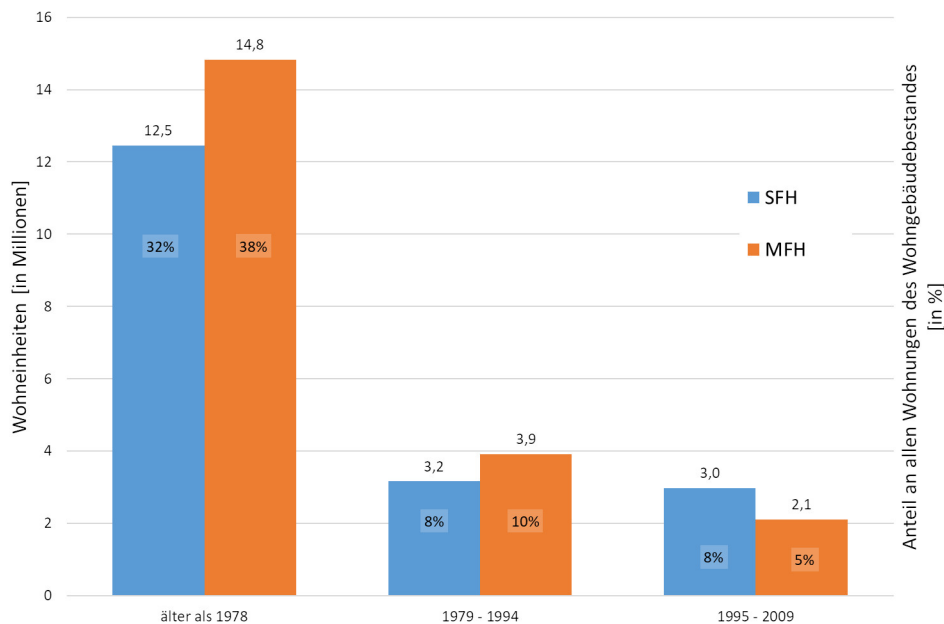


Abbildung 2.2: Anzahl an Wohneinheiten bei Einfamilienhäuser (SFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) [3]

2.2 Historische Entwicklung der Dämmstandards

Nachdem im vorherigen Kapitel der Gebäudebestand nach Alter und Größe beschrieben wurde, werden nun die zu den jeweiligen Gebäudealtern und -größen zugehörigen Dämmstandards vorgestellt. Da die Dämmung eines Gebäudes dessen Wärmeverluste und folglich dessen Endenergieverbrauch beeinflusst, stellt diese ein wichtiges Charakteristikum zur Klassifizierung des Bestandes dar.

bis 1918: period of promoterism ("Gründerzeit"), rapid expansion of the cities and growing industrialisation; standardisation of construction principles; different regional manifestations

1919 - 1948: increasing industrialised production of building materials; use of cost efficient material-saving constructions; standardisation on national level

1949 - 1957: simple building techniques of the post-war period; often use of debris materials; further development of construction standards (introduction of DIN 4108 – "Wärmeschutz im Hochbau" in 1952); introduction of social housing principles

1958 - 1968: requirements on thermal insulation in force (DIN 4108 – "Wärmeschutz im Hochbau"); further industrialisation of building construction; development of panel buildings (GDR: "Plattenbauten")

1969 - 1978: new industrial building techniques (sandwich elements); also introduction of prefabricated single family houses (lightweight constructions "Fertighaus"); thermal insulation becomes more relevant in consequence of the first oil crisis

1979 - 1983: 1st thermal protection ordinance (1. Wärmeschutzverordnung)

1984 - 1994: 2nd thermal protection ordinance (2. Wärmeschutzverordnung); GDR: further improved insulation ("Rationalisierungsstufe III") market introduction of low energy houses, supported by regional grant programmes

1995 - 2001: 3rd thermal protection ordinance (3. Wärmeschutzverordnung); consideration of a bonus in the tax in case of realisation of a low energy house

2002 - 2009: energy saving ordinance ("EnEV 2002"), considering building and heat supply system; KfW grant programmes ("KfW-Energiesparhaus 60 and 40", Passive Houses)

2010 ... : new requirements of energy saving ordinance ("EnEV 2009") on the level of low energy buildings new KfW grant programme regulations ("KfW-Effizienzhaus 70, 55 and 40", Passive Houses)

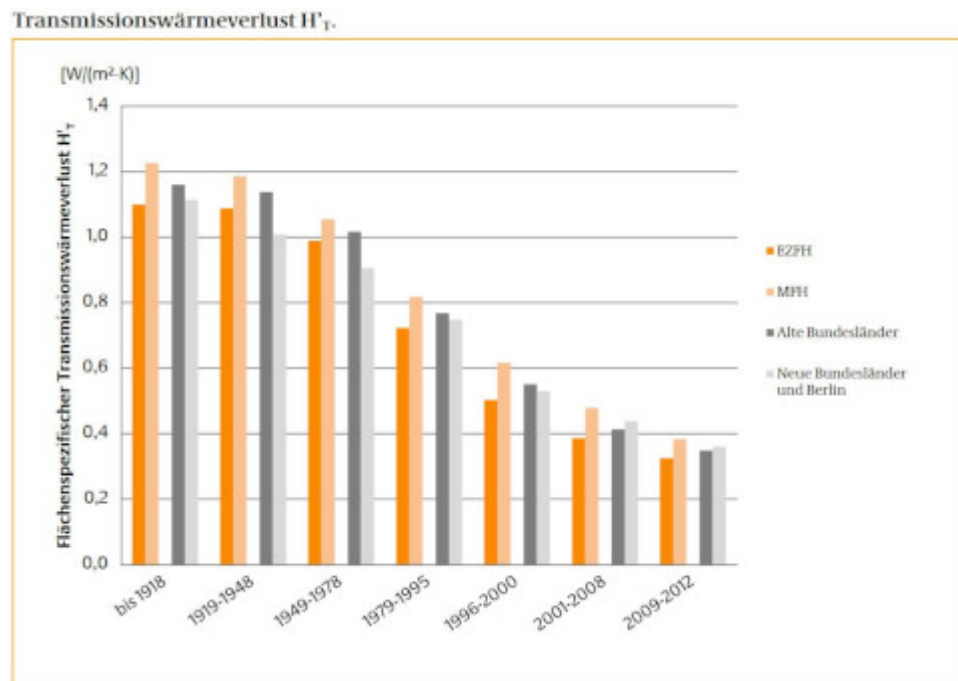


Abbildung 2.3: tba

2.3 Sanierungsstand des deutschen Wohngebäudebestandes

2.4 Optimierungsmodell

3 Stand der Forschung

3.1 Motivation

das ist die einleitung

3.2 Aufgabenstellung

das ist die aufgabenstellung

Literaturverzeichnis

- [1] *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden.* Neue Ausg. Darmstadt : Wohnen und Umwelt, 2015. – ISBN 978-3-941140-47-9
- [2] STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER: *Gebäude mit Wohnraum nach Art des Gebäudes und Baujahr (Mikrozensus-Klassen).* https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_10_2,m,table. Version: 2014
- [3] STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER: *Gebäude mit Wohnraum nach Art des Gebäudes, Zahl der Wohnungen und Baujahr (Mikrozensus-Klassen).* https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_10_8,m,table. Version: 2014

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 10. Mai 2019

Jonas Baumgärtner