

Institut für elektrische Anlagen und Netze

# IEAN



## **Messtechnische Analyse**

## von Infrarotpaneelen

Eine Masterarbeit von Valon Rizvanaj, BSc

Betreuer Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl Dipl.-Ing. Dr.techn. BSc Mike Alexander Lagler Dipl.-Ing. BSc Markus Resch

April 2022

Technische Universität Graz Institut für Elektrische Anlagen und Netze Inffeldgasse 18/I 8010 Graz Österreich

#### Institutsleiter

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

#### Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl Dipl.-Ing. Dr.techn. B.Sc. Mike Alexander Lagler Dipl.-Ing. B.Sc. Markus Resch

Eine Masterarbeit von Valon Rizvanaj, B.Sc.

April 2022

#### **Statutory Declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, April 18lth, 2022

Rizvanaj Valon

#### Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 18.04.2022

Rizvanaj Valon

#### Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die an den der Entstehung dieser Masterarbeit beteiligt waren und mich im Lauf meines Studiums unterstützen.

Für die Begutachtung möchte ich mich bei Frau Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl bedanken, ohne dessen Hilfe diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Ganz besonders gilt mein Dank Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. B.Sc. Mike Alexander Lagler, der meine Arbeit und somit auch mich betreut hat und mich im Rahmen dieser Arbeit durch ihr Fachwissen und ihre Hilfsbereitschaft unterstützte. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. B.Sc. Markus Resch bedanken.

Ein großer Dank richtet sich an meine Mutter Fatmire Rizvanaj an meinen verstorbenen Vater Isat Rizvanaj, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten. Mein verstorbener Vater hat immer an mich geglaubt und mich ohne Ausnahme unterstützt. Möge Gott sich der Seele meines Vaters Erbarmen. Ebenso möchte ich mich bei meinen Geschwistern für finanzielle Unterstützung bedanken. Ein herzliches Dankeschön geht an meine liebe Frau Bukurije Rizvanaj, BSc. und an meinem lieben Sohn Sufjan Rizvanaj, die mir immer wieder Zuversicht gegeben haben und immer hinter mir standen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich während dieser Zeit unterstützt und begleitet haben.

#### Kurzfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit am Institut für Elektrische Anlagen und Netze wurde ein Konzept zur elektrotechnischen Vermessung von Infrarotpaneelen erstellt, sowie als Laboraufbau realisiert und erprobt. Als Grundlage wurde die zur Verfügung stehende Fachliteratur (wissenschaftliche Veröffentlichungen) und die betroffenen Normen (z.B. EN 61000, EN 60335, EN 62233, etc.) in Bezug auf den Stand der Technik, bzw. den Stand der Wissenschaft analysiert. Das Produkt "Elektrizität" untersteht wie jedes andere Produkt gewissen Mindestanforderungen an Qualität (z.B. Spannungshöhe, transiente und netzfrequente Überspannungen, Frequenz, etc.). Um unerwünschte Netzrückwirkungen durch Kundenanlagen (z.B. Infrarotpaneele) so klein wie möglich zu halten, müssen bestimmte Grenzwerte vorgegebener Normen und Verträge eingehalten werden. Im entwickelten Laboraufbau wurden Infrarotpaneele unter Einhaltung der geltenden Mess- und Prüfnormen vermessen bzw. überprüft. Hierbei wurden die elektrischen Parameter mittels Energie- und Power-Quality-Analysen und Messungen der elektromagnetischen Felder (EMF/EMV), sowie die Oberflächentemperatur der Paneele (Vorderseite und Rückseite) mittels Temperaturfühlern und einer Wärmebildkamera gemessen und ausgewertet. Des Weiteren wurde eine detaillierte, wirtschaftliche Analyse von Infrarotpaneelen durchgeführt.

Schlüsselworte: Infrarotpaneel, IR-Paneel, elektromagnetischen Strahlung, Heizsysteme, EMV

#### Abstract

Within the scope of this master thesis at the Institute for Electrical Systems and Networks, a concept for the electrotechnical measurement of infrared panels has been created, realized and tested in a laboratory setup. As a basis, the available technical literature (scientific publications) and the relevant standards (e.g. EN 61000, EN 60335, EN 62233, etc.) have been analyzed in relation to the state of the art, or the state of science. The product "electricity", like any other product, is subject to certain minimum quality requirements (e.g. voltage level, transient and mains overvoltages, frequency, etc.). In order to keep undesired grid perturbations by customer installations (e.g. infrared panels) as small as possible, certain limit values of given standards and contracts must be kept. In the developed laboratory set-up, infrared panels have been measured and tested in compliance with the applicable measurement and test standards. For this purpose, the electrical parameters have been gathered and evaluated by means of energy and power quality analyses and measurements of the electromagnetic fields (EMF/EMC), as well as the surface temperature of the panels (front and back) by means of temperature sensors and a thermal imaging camera. Furthermore, a detailed economic analysis of infrared panels has been performed.

Keywords: Infrared panel, IR-panel, electromagnetic radiation, heating systems, EMC.

## List of Symbols

α	Absorption
$\alpha_k$	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{Str.}$	Strahlungswirkungsgrad (%)
Е	Emissionsgrad
$\mathcal{E}_1$	Emissionsgrad des Paneels
$\mathcal{E}_2$	Emissionsgrad der Wände
λ	Leistungsfaktor
$\lambda_T$	Wärmeleitfähigkeit (kw/mK)
μm	Mikrometer
$\mu T$	Mikrotesla
μ	Materialkenngröße Permeabilität
μ <sub>0</sub>	Vakuumpermeabilität 4π10 <sup>-7</sup> Vs/Am
$\mu_r$	In Luft und auch biologischen Gewebe ist $\mu r \approx 1$
σ	Stefan-Boltzmann- Konstante (5.67 *10 <sup>-8</sup> kW/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
€	Euro

### List of Abbreviations

Α	Wärmtauschfläche [m <sup>2</sup> ]
<i>A</i> <sub>1</sub>	Vorderfläche des Heizpaneels (m <sup>2</sup> )
В	Magnetische Flussdichte $1T = 1Vs/m^2$
СОР	Coefficient of Performance
Cs	Strahlungskonstante des Schwarzen Körpers (W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
d	Abstand zweier Äquipotenziallinien (m)
Ε	Elektrische Feldstärke (V/m)
EMF	Elektromagnetischen Felder
EMV	Elektromagnetischen Verträglichkeit

f	Frequenz [Hz]
GHz	Gigahertz
Н	Magnetische Feldstärke (A/m)
Ι	Elektrische Strom (A)
IEAN	Institut für Elektrische Anlagen und Netze
IR-Paneel	Infrarotpaneel
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
k	Strahlungsaustauschgrad
Р	Strahlungsleistung (W)
P <sub>Hinten</sub>	Strahlung Rückseite des IR- Paneels
P <sub>Vorne</sub>	Strahlung Vorderseite des IR- Paneels
P Konv.	Strahlung Konvektion
P <sub>Sum</sub> .	Strahlung (Summe)
$\overline{P}$	Leistungsaufnahme (W)
$\overline{P}'$	Spezifische Leistung
P <sub>abs.</sub>	absorbierte Strahlungsleistung (W/m <sup>2</sup> )
P <sub>Beharr</sub> .	Leistung bei Beharrungstemperatur
P <sub>el</sub> .	Elektrische Leistung (zugeführte elektrische Leistung) (W)
P <sub>einf</sub> .	einfallende Strahlungsleistung (W/m <sup>2</sup> )
P <sub>Ober</sub> .	emittierte Strahlungsleistung einer Oberfläche (W/m <sup>2</sup> )
P <sub>Schw</sub> .	emittierte Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers (W/m <sup>2</sup> )
<i>P</i> <sub>12</sub>	Strahlungsaustausch
Q <sub>str.</sub>	Wärmestrahlung (W)
$\bar{Q}_{WL}$	Wärmestrom durch Konvektion (W)
r	Kreisförmiger Abstand (m)
Т	Temperatur (K)
<i>T</i> <sub>1</sub>	Temperatur des Infrarotpaneels (°C)

<i>T</i> <sub>2</sub>	Umgebungstemperatur (°C)
$\Delta T$	Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen (K)
T <sub>max, Vorne</sub>	maximale Oberflächentemperatur an der Vorderseite des IR- Paneels
$T_{max,Hinten}$	maximale Oberflächentemperatur an der Rückseite des IR- Paneels
$\mathcal{T}_{abk\ddot{u}hl}$	Temperatur währen der Abkühlzeit des IR- Paneels
$\mathcal{T}_{Gipskartonwand}$	Temperatur an der Gipskartonwand
THz	Terahertz
THD <sub>U</sub>	Total Harmonic Distortion der Spannung
TU Graz	Technische Universität Graz
$t_{ m all,\ dauer}$	Dauerzeit der Messung
$t_{\scriptscriptstyle Beharr}$	Dauerzeit der Messung, bis Beharrungszustand erreich wird
t <sub>abküh</sub>	Abkühlzeit des IR- Paneels
U	Elektrische Spannung (V)
	I

### Inhaltverzeichnis

Einfi	ührung1
1.1	Motivation1
1.2	Aufgabestellung1
Theo	orie der Infrarotheizsysteme2
2.1	Allgemeines2
2.2	Grundlage der Infrarotstrahlung4
2.2.1	Wärmeübertragung4
2.2.2	Elektromagnetische Spektrum6
2.3	Definition und Funktionsweise der Infrarotheizung8
2.3.1	Einteilung der Infrarotheizung nach ihren Eigenschaften8
2.3.	1.1 Gas-Infrarotheizungen9
2.3.	1.2 Elektrische Infrarotheizungen9
2.3.2	Strahlungswärmeverteilung bei Infrarotpaneelen11
2.4	Technischer Aufbau und Temperatursteuerung eines Infrarotpaneels14
2.5	Infrarot-Heizanstrich16
2.6	Wirkungsweise der Infrarotheizung bei den Menschen
2.6.1	Allgemein
2.6.2	Wirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen19
Gren	nzwerte laut betroffener Normen21
3.1	Normen für die Messung und Berechnung der Infrarotheizung nach PANEIA- Industriestandard21
3.2	Normen für Sicherheit der Personen von elektromagnetischen Feldern und Sicherheit elektrischer Haushaltgeräte
3.3	Normen für elektrische Niederspannungsanlage25
Labo	oraufbau zur elektrotechnischen Evaluierung von
Infra	rotpaneelen26
4.1	Auswahl der Infrarotpaneele für die praktische Untersuchung
4.2	Messungen an ausgewählten Infrarotpaneelen27
4.3	Messdaten und Messauswertung28
	Einfi 1.1 1.2 Theo 2.1 2.2 2.2.1 2.2.2 2.3 2.3.1 2.3.2 2.3 2.3.2 2.4 2.5 2.6 2.6.1 2.6.2 Gren 3.1 3.2 3.3 Labo Infra 4.1 4.2 4.3

	4.3.1	Eleł	ktrische Messung	28
	4.3.	1.1	Versuchsaufbau	28
	4.3.	1.2	Messergebnisse	28
	4.3.	1.3	Diskussion	29
	4.3.2	Mes	ssung der elektromagnetischen Felder	
	4.3.	2.1	Versuchsaufbau	
	4.3.	2.2	Messergebnisse	31
	4.3.	2.3	Diskussion	32
	4.3.3	Wä Rüd	rmestrahlungs- und Temperaturmessungen an den Paneelen ckseite)	(Vorderseite und
	4.3.	3.1	Versuchsaufbau	32
	4.3.	3.2	Messergebnisse	33
	4.3.	3.3	Diskussion	33
	4.3.4	Stra	ahlungsleistung und Strahlungswirkungsgrad	34
	4.3.	4.1	Versuchsaufbau	34
	4.3.	4.2	Messergebnisse	34
	4.3.	4.3	Diskussion	35
	4.3.5	Ger	äteverzeichnis	35
5	Wirt	sch	aftliche Analyse von IR-Heizungen	36
	5.1	Infra	arotpaneele am europäischen Markt	
	5.1.1	Inve	estitionskosten von Infrarotpaneelen	40
	5.2	Eleł	ktrischer Energiebedarf und Energiekosten von Infrarotpaneelen	41
	5.2.1	Leis	stungsbedarf des IR- Paneels zu der Beheizung der Räume	41
	5.2.2	Heiz	zkosten mit Infrarotpaneel	49
6	Zusa	amn	nenfassung und Ausblick	51
7	Liter	atu	rverzeichnis	53
8	Anha	ang		i
	8.1	Eleł	xtrische Messergebnisse	i
	8.2	Mes	ssergebnisse der magnetischer Felder	iii
	8.3	Wäı	rmtechnische Messergebnisse	vi

8.4	Strahlungswirkungsgrad	İX
8.5	Elektrischer Energiebedarf einer IR- Heizung	xi

## 1 Einführung

#### 1.1 Motivation

Durch steigende Energiepreise bei Öl und Gas wird zukünftig das Heizen mit elektrischer Energie immer reizvoller [1]. Da das Infrarotpaneel eine elektrische Heizung ist und elektrische Energie (Strom) als Energiequelle benötigt, wird es auch zukünftig ein gefragtes Heizsystem sein.

Obwohl es bereits eine Vielzahl von Infrarotpaneelen am Markt gibt, sind hinsichtlich des energietechnischen Verhaltens zur Zeit noch wenige Details bekannt. Potenziellen Anwendern ist es nur eingeschränkt möglich, verschiedene Produkte in ihrer Wirkung zu beurteilen und miteinander zu vergleichen. Gefragt sind daher eine fundierte Beschreibung des energietechnischen Verhaltens sowie ein Set an aussagekräftigen und einheitlichen Vergleichskriterien, wie man es aus anderen Sparten kennt. Darunter fallen beispielweise die Energieeffizienzklasse von Haushaltsgeräten oder wie bei anderen Heizsystemen Wirkungsgrad bei Feuerungen oder Coefficient of Performance (COP) bei Wärmepumpen. Um dem oben erwähnten Ziel einen Schritt näher zu kommen, wurde im Zuge dieser Masterarbeit am Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN) eine Analyse des thermischen und des elektrischen Verhaltens der am Markt erhältlichen Infrarotpaneele und Produkte ähnlicher Anwendung wie Folien, Anstriche etc., sowie eine wirtschaftliche Analyse durchgeführt.

#### 1.2 Aufgabestellung

Am Anfang dieser Masterarbeit wurde zur Verfügung stehende Fachliteratur und die betroffenen Normen z. B. EN 61000, EN 60335, EN 62233 in Bezug auf den Stand der Technik und den der Wissenschaft analysiert. Danach wurde ein Konzept zur elektrotechnischen Vermessung von Infrarotpaneelen erstellt, sowie als Laboraufbau realisiert und überprüft. Im entwickelten Laboraufbau wurden die elektrischen Parameter mittels Energie- und Power-Quality-Analysen und Messungen der elektromagnetischen Felder (EMF/EMV), sowie die Oberflächentemperatur der Paneele (Vorderseite und Rückseite) mittels Temperaturfühlern und einer Wärmebildkamera gemessen und ausgewertet. Die Messergebnisse wurden im Zuge eines verfassten Projektberichts am IEAN ausgewertet. Des Weiteren wurde eine detaillierte, wirtschaftliche Analyse von Infrarotpaneelen durchgeführt. Dabei wurden die Investitionskosten, elektrischer Energiebedarf und die Energiekosten von Infrarotpaneelen näher beleuchtet.

## 2 Theorie der Infrarotheizsysteme

#### 2.1 Allgemeines

Die Infrarotheizung ist eine elektrische Heizung, die auf Wärmestrahlung basiert. Die Wärmestrahlung gehört zur Familie der elektromagnetischen Strahlen mit einem Spektralbereich zwischen sichtbarem Licht und der langwelligen Terahertzstrahlung und strahlt ähnlich wie die Sonne als besonders angenehm empfundene Direktwärme aus. Sie liegt im Wellenbereich von 0,78–1000 µm bzw. im Frequenzbereich 384–0,3THz. Bei der Einteilung des Infrarotspektralbereiches lassen sich nahes-, mittleres- und fernes Infrarot unterscheiden (siehe Kapitel 2.2.2)[1].

Infrarotheizungssysteme unterscheiden sich zu anderen Heizungssysteme durch die Form der Wärmeübertragung. Denn bei anderen Heizungssysteme wird die Luft durch Konvektionsheizungen aktiv erwärmt. Die Konvektion wird als Wärmverteiler eingesetzt. Bei den Infrarotheizungen werden durch elektromagnetische Strahlung bzw. Wärmestrahlung feste Gegenstände und Körper direkt erwärmt [2]. Das bedeutet, dass die Infrarotheizungen durch die Infrarotstrahlung an Stelle der Umgebungsluft die bestrahlten Körper, die Wände, Möbel oder Personen erwärmt. An den erwärmten Objekten wird schließlich auch die Luft erwärmt [3]. Infrarotheizungen zeichnen sich durch ein behagliches Raumklima aus. In Abbildung 1 sieht man, dass die Infrarotheizungssystem nach einer Behaglichkeitstemperatur strebt, die in der Mitte von Raumlufttemperatur und Wandoberflächentemperatur liegt. Die sogenannte Behaglichkeitstemperatur wird bei einer Infrarotheizung durch eine Raumlufttemperatur von zum Beispiel 15°C und einer Wandtemperatur von 22°C erreicht (siehe grüner Pfeil) [2]. Die Behaglichkeitstemperatur ist auch dann erreicht, wenn mindestens 90 % einer statistisch signifikanten Personenzahl mit dem Raumklima zufrieden ist [1].



Abbildung 1: Behaglichkeitsprofil aus Wand- und Raumlufttemperatur [4]

Durch Beheizung mit Infrarotstrahlung werden die Raumflächen erwärmt und können die Wärmestrahlung der Infrarotheizung sowohl absorbieren als auch emittieren. Dies erfolgt durch den Infrarotstrahlungsaustausch, der zum Heizen von Innenraumflächen genutzt werden kann. Das heißt,

dass durch Infrarotstrahlungsaustausch eine Verteilung der Wärmeüberschüsse von wärmeren auf kältere Flächen erfolgt. Ohne den Infrarotstrahlungsaustausch wäre es überhaupt nicht möglich, Gebäude durch Infrarotstrahlung zu beheizen. In Abbildung 2 ist die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Flächentemperatur der Wände dargestellt, wobei die Differenz 1°C bis 2°C beträgt. Diese niedrige Differenztemperatur macht das Raumklima ausgewogen (siehe Kapitel 2.3.2) [5].



#### Abbildung 2: Temperaturdifferenz zwischen Luft und Flächen [5]

Grundsätzlich gibt es sowohl Niedertemperatur-, als auch Hochtemperatur-Infrarotheizungen. Hochtemperatur-Infrarotheizungen sind Heizkörper mit Temperaturen größer als 200°C. Im Gegensatz dazu erreichen Niedertemperatur-Infrarotheizung eine Oberflächentemperatur bis max. 200°C. Es gibt Wand- und Deckeninfrarotpaneele. Die Oberfläche der Wandinfrarotpaneele im eingeschalten Zustand kann sich auf ca. 80–120°C erwärmen und die Oberfläche eines Deckeninfrarotpaneels erwärmt sich im eingeschalten Zustand auf bis zu 200 °C (siehe Kapitel 2.3.1.2).

Ein wichtiger Faktor für Infrarotstrahlung ist die Strahlungsleistung, die bei einer Infrarotheizung durch Fläche in W/m<sup>2</sup> bestimmt werden kann. Wie groß die Strahlungsleistung einer Infrarotheizung ist, hängt von der Oberflächentemperatur, der wärmeabgebenden Fläche und der Bauform der Heizung ab [2]. Ein anderer wichtiger Faktor bei der Infrarotheizung ist der Strahlungswirkungsgrad. Unter dem Strahlungswirkungsgrad eines Heizkörpers versteht man den Anteil der Wärmabgabe bzw. die Wärmeleistung eines Heizkörpers, der in Form von Wärmestrahlung abgegeben wird (siehe Kapitel 2.3.2) [1].

Ökonomisch gesehen, bieten Infrarotheizungen, insbesondere in Kombinationsmöglichkeit mit Photovoltaik- Anlagen niedrige Betriebskosten [6]. Aufgrund hohen Energieeffizienz und den geringen Investitions- und Betriebskosten sind Infrarotheizungen gefragte Heizsysteme am Markt. Sie gehören zu den innovativen Heizsystemen. In Kapitel 5 wird eine detaillierte, wirtschaftliche Analyse von Infrarotpaneelen durchgeführt.

#### 2.2 Grundlage der Infrarotstrahlung

#### 2.2.1 Wärmeübertragung

Aus der Physik wissen wir, dass Wärme, als Maß für die Energie, notwendig ist, um die Temperatur eines Körpers zu ändern [7]. Als Infrarotwärme werden in der Physik elektromagnetische Wellen bezeichnet [8]. Wärmeübertragung ist ein Prozess, bei dem thermische Energie bzw. Wärme übertragen wird. Es gibt grundsätzlich drei unterschiedliche Arten der Wärmeübertragung [2]:

<u>Wärmeleitung oder Konduktion</u>: Bei der Wärmeleitung wird die Wärmeenergie von einem Ort mit höherer Temperatur durch in Ruhe befindliche Festkörper zu einem Ort mit niedrigerer Temperatur übertragen. Dieser Vorgang findet so lange statt, bis sich das Temperaturniveau angeglichen hat. Diese Art der Wärmübertragung gelingt durch einen Festkörper oder ein sehr ruhiges Fluid ohne entstehende Verluste [9]. Für die Berechnung des Wärmstroms durch Wärmeleitung wird Formel 2:1 verwendet [10]:

$$\bar{Q}_{WL} = \lambda_T \frac{A}{d} \Delta T$$
 2:1

wobei die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_T$  temperaturabhängig ist.

Konvektion: Konvektion beschreibt die Kombination von Wärmeleitung und Energieübertragung durch ein strömendes Fluid. Grundsätzlich werden zwei Arten der Konvektion unterschieden: die erzwungene Konvektion, die erfolgt, wenn der Strömungsvorgang durch äußere mechanische Einwirkung wie eine Pumpe verursacht wird und die freier Konvektion, die erfolgt, wenn die Flüssigkeiten oder Gase aufgrund von Temperaturunterschieden transportiert werden [10]. Der Wärmestroms durch die Konvektion lässt sich mit der Formel 2:2 berechnen:

$$\bar{Q}_{Kon.} = A \ \alpha_k \ \Delta T \tag{2:2}$$

Dieses Gesetz besagt, dass die Wärmedifferenz zwischen einem Festkörper und einem Fluid proportional zur Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen beiden ist. Ein Heizkörper im eingeschalteten Vorgang erwärmt die Umgebungsluft durch Konvektion, wobei erwärmte Umgebungsluft aufgrund der niedrigeren Dichte nach oben steigt und die kältere Luft zu Boden drückt. Es gibt verschiedene Arten von Konvektionsheizungen [5]:

- Fußbodenheizung
- Flach- und Kompaktheizkörper mit innenliegenden oder rückseitig angeflanschten Konvektionsblechen
- Gliederheizkörper mit nach innen gewendeten, sich gegenüberstehenden Heizflächen
- Rippen- und Rohrheizkörper mit geringem Hohlraum
- Zuluftheizungen und Heizlüfter

**Wärmestrahlung:** Wärmestrahlung ist Energie, die in Form einer elektromagnetischen Strahlung emittiert wird. Sie wird meist durch infrarote Wellen an die Umgebung übertragen und im Gegensatz zu Konvektion und Wärmeleitung wird bei der Wärmestrahlung nicht die Luft, sondern feste Gegenstände und Körper direkt erwärmt [2].

Die schwarzen Flächen strahlen am meistens Wärmestrahlung ab, und können genau so viel Strahlung emittieren wie absorbieren. Das bedeutet, alle Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt, –273°C (= 0 K), senden und empfangen Wärmestrahlung. Im Abbildung 3 ist die Plancksche Strahlungsdichte eines schwarzen Körpers dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei Umgebungstemperatur von ca. 300 K (rote Kurve) das Maximum der Planck-Kurve bei 10 µm liegt. Die rote Kurve stellt das Strahlungsprofil des Menschen dar. Das Strahlungsprofil der Sonne liegt im Temperaturbereich von 5777 K und wird als gelbe Kurve dargestellt. Je höher die Temperatur eines Körpers, desto kürzer dessen Wellenlänge.



Abbildung 3: Planck'sche Strahlungsdichte eines schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen [11]

Wie viel Strahlung von einem sogenannten schwarzen Körper abgegeben wird, hängt von dem Emissionsgrad des Körpers ab. Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  wird als das Verhältnis zwischen der emittierten Strahlungsleistung einer Oberfläche  $P_{ober.}$  bei einer vorgegebenen Temperatur zur emittierten Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers  $P_{schw.}$  bei gleicher Temperatur definiert [12]. Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  lässt sich mit der Formel 2:3 berechnen.

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{Ober.}}}{P_{\text{Schw.}}}$$
2:3

Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  liegt zwischen 0 und 1 ( $0 < \varepsilon < 1$ ) und ist vom Material, vom Spektralbereich und von der Temperatur der Oberfläche abhängig. Die Oberfläche eines abgestrahlten Körpers kann die Strahlung zu 100 % aufnehmen und aussenden, wenn der Emissionsgrad den Wert 1 ( $\varepsilon = 1$ ) erreicht hat. Dieser Wert kann praktisch nicht erreicht werden, doch bei den meisten Oberflächen werden 85 % bis 98 % der Leistung des schwarzen Strahlers abgestrahlt [5]. Bei der Wärmestrahlung entspricht der Emissionsgrad  $\varepsilon$  dem Absorptionsgrad  $\alpha$ , welcher als das Verhältnis zwischen der absorbierten Strahlungsleistung  $P_{abs.}$  zur einfallenden Strahlungsleistung  $P_{einf.}$  definiert wird und sich mit der Formel 2:4 berechnen [13].

$$\alpha = \frac{P_{\text{abs.}}}{P_{\text{einf.}}}$$
2:4

Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz haben Emissionsgrad  $\varepsilon$  und Absorptionsgrad  $\alpha$  immer denselben Infrarot-Wert ( $\varepsilon = \alpha$ ) [14]. Ein Körper strahlt daher umso besser, je wirksamer er Strahlung absorbiert [15]. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz erklärt den Zusammenhang zwischen der Lichtabstrahlung mit der Körpertemperatur für einen schwarzen Körper. Dieses Gesetz gibt an, welche Wärmestrahlung  $\overline{Q}_{Str}$  ein schwarzer Körper der Fläche *A* und der absoluten Temperatur *T* emittiert [16]. Strahlungsleistung *P* lässt sich mit der Formel 2:5 berechnen:

$$P = A \sigma \varepsilon T^4$$
 2:5

Dabei ist die Strahlungsleistung *P* einer temperierten Fläche proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur  $T^4$  einer Oberfläche. Das bedeutet, die abgegebene Leistung steigt mit zunehmender Temperatur stark an. Die Strahlungsleistung von Flächen wird in W/m<sup>2</sup> angegeben [5]. Der Strahlungsaustausch  $P_{12}$  zwischen zwei Körper lässt sich mit der Formel 2:6 berechnen:

$$P_{12} = \sigma \ k(\ T_1^4 - T_2^4)$$
 2:6

Der Strahlenaustauschgrad *k* hängt von der Größe der gegenseitig zugewandten Körperoberflächen und den Strahlungsfaktoren  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  ab (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Strahlungsaustausch zwischen zwei Körpern [16]

Dieser Vorgang des Strahlungsaustauschs dauert solange an, bis die beiden Körper die gleiche Temperatur haben [11].

Anzumerken ist, dass die Formel des Strahlungsaustauschs für die Bestimmung der Strahlungsleistung nicht verwendbar ist, da der Strahlungsaustausch und die Strahlungsleistung verschieden zu betrachtenden Sachverhalten sind. Strahlungsausgleich und Strahlungsleistung stimmen miteinander überein, wenn der zweite Strahler die Temperatur des absoluten Nullpunktes von –273°C (0 K) annimmt, wobei dann die Fläche  $T_2 = 0$ °C wird und es verbleibt danach nur die Fläche  $T_1$  (siehe Kapitel 2.3.2) [17].

#### 2.2.2 Elektromagnetische Spektrum

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, ist Infrarotstrahlung jener Teil der Sonnenstrahlung, die beim Auftreffen auf der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt wird [18]. Technisch gesehen, ist Infrarotstrahlung als Wärmestrahlung Teil des elektromagnetischen Spektrums, das als eine elektromagnetische Welle in

unterschiedlichen Wellenlängenbereichen unterteilt wird. Der Infrarotwellenlängenbereich befindet sich zwischen 0,78 und 1 000 µm und liegt im elektromagnetischen Spektrum noch unterhalb des sichtbaren Lichts (siehe Abbildung 5) [2]. Die Wellenlänge  $\lambda$  der Infrarotstrahlung bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit *c*, wobei sich die Frequenz *f* nach der Formel  $f = \frac{c}{\lambda}$  berechnen lässt. Dadurch erkennen wir, dass der Frequenzbereich der Infrarotstrahlung im elektromagnetischen Spektrum im Bereich zwischen 100 THz und 300 GHz liegt.



Abbildung 5: Elektromagnetisches Spektrum [19]

Die Wellenlänge dieser Strahlung ist von der Temperatur abhängig. Infrarotstrahlung lässt sich je nach Wellenlänge in Infrarot-A, Infrarot-B und Infrarot-C unterscheiden:

- Wie in Abbildung 5 zu sehen, liegt Infrarot-A in einem Wellenlängenbereich zwischen 0,78–1,4 µm. Diese Art der Infrarotstrahlung befindet sich in einem Kurzwellenbereich und wird oft auch als nahe Infrarotstrahlung bezeichnet. Die Oberfläche eines Heizelementes wird durch Infrarot-A eine höhere Temperatur als 900°C erreichen und gibt die Strahlung im sichtbaren Lichtbereich ab.
- Infrarot-B, auch als mittlere Infrarotstrahlung bekannt, liegt in einem Wellenlängenbereich zwischen 1,4–3 µm. Die Oberfläche einer Infrarotheizung bei der Strahlung mit Infrarot-B sendet Wärmestrahlung in einem Temperaturbereich von 300–900°C aus. Bei diesem Temperaturbereich werden die Wellenlänge sehr kurz und verschieben sich in den Bereich des sichtbaren Lichts.
- Bei Infrarot-C handelt es sich um die langwelligsten Strahlen. Sie liegen in einem Wellenlängenbereich 3,0–1000 µm und gehört zu den nicht sichtbaren Strahlen. Die Oberfläche einer Infrarotheizung kann bei den Strahlen mit Infrarot-C eine Temperatur bis 200°C erreichen [2].

Gemäß DIN 5031-7 ist in der Tabelle 1 die Einteilung der Infrarotspektralbereiche mit Wellenlängenbereich, Frequenzbereich und Temperaturbereich der Infrarotstrahlung dargestellt.

	Spektralbereich						
Benennung der Strahlung	Kurzzeich en		Wellenlänge in µm	Frequenz in THz	Infrarotstrahlern	Temperaturbereich der Oberflächentemp. in °C	
Nahes Infrarot	NIR	IR-A	0,78–1,4	384–215	sichtbares Glühelement	≥ 900	
Mittleres Infrarot	MIR	IR-B	1,4–3,0	215–100	sichtbares Glühelement	300-900	
Fernes Infrarot	FIR	IR-C	3,0–1000	100–0,3	langwelligsten Strahlen (nicht sichtbare Strahl)	≤ 200	

Tabelle 1: Einteilung der Infrarotspektralbereiche [2]

Die Strahlung der nahen Infrarot A dringen tief in die Haut bis ins Unterhautgewebe ein. Bei mittleren Infrarot B hingegen, dringt die Strahlung bis zur Lederhaut vor. Im Gegensatz dazu wird langwellige Infrarotstrahlung C von der Hautoberfläche absorbiert und ist für Haut und Augen absolut ungefährlich. Infrarotstrahlung C ist nicht sichtbar, wird aber über die Wärmerezeptoren der Haut direkt empfunden und dringt nur oberflächlich ins menschliche Gewebe ein [18].

#### 2.3 Definition und Funktionsweise der Infrarotheizung

Infrarotheizungen sind Elektro-Heizstrahler, die Wärme in Form von Infrarotstrahlung beziehungsweise Wärmestrahlung abgeben. Sie stehen allgemein für die Beheizung von Räumen oder Gebäuden mit Infrarotstrahlung bzw. Wärmestrahlung, wobei die Strahlung auf Gegenständen, Personen oder festen Oberflächen direkt in Wärme umgewandelt wird. Die Wärmeabgabe von Infrarotheizungen geschieht über die Fläche: Die Anlage einer elektrischen Spannung an das Heizelement führt zu einer Erwärmung der Oberfläche und damit zum Aussenden von Infrarotstrahlung. Man definiert die Infrarotheizung auch als Strahlungsheizung, wenn die über den Heizkörper in den Raum abgegebene Energie einen Strahlungsanteil von mehr als 50 % erreicht. Der Strahlungsanteil bezeichnet den Anteil der Wärmeabgabe eines Heizkörpers und wird als wichtiges Gütekriterium zur Beurteilung von Heizsystemen gesehen. Je höher der Strahlungsanteil liegt, desto besser ist die Infrarotheizung. Sollte eine Strahlungsheizung (Luftheizung). Wie hoch die Strahlungsanteil der Infrarotheizung ist, hängt von der Oberflächentemperatur, Oberflächenbeschaffenheit und der Bauform des Heizkörpers ab [11].

Je höher die Flächentemperatur einer Infrarotheizung ist, desto größer ist die abgegebene Strahlungsleistung. Bei sehr hohen Temperaturen werden die Wellenlängen sehr kurz und verschieben sich in den Bereich des sichtbaren Lichts.

#### 2.3.1 Einteilung der Infrarotheizung nach ihren Eigenschaften

Als Energiequelle für Infrarotstrahler wird Gas oder elektrischer Strom verwendet. Das heißt, die Infrarotheizungen lassen sich durch Gas und elektrischer Strom betrieben.

#### 2.3.1.1 Gas-Infrarotheizungen

Gasinfrarotheizungen (Heizstrahler) funktionieren im Vergleich zu Elektro-Heizung nach einem völlig anderen Prinzip, jenem der Verbrennung. Das Gas, meist Flüssiggas oder Erdgas, wird im Brenner entzündet und betreibt damit die Gasinfrarotheizung. Dadurch entsteht Wärme, die wiederum in einem geschlossenen Kreislauf durch Heizkörper und die Wohnung zirkuliert. Um Risiko bei der Verwendung von Gasinfrarotheizungen zu minimieren, müssen besondere Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden, denn das Gas kann sich schnell entzünden und zu Explosionen führen. Gasinfrarotheizungen sind Hochtemperatur-Infrarotheizungen, die eine Temperatur von mehreren hundert bis über tausend Grad abstrahlen können [11].

Eine Vergleichsmessung zwischen Infrarotheizung und Gasheizung im Detail in [20] beschrieben.

#### 2.3.1.2 Elektrische Infrarotheizungen

Alle Heizungen, die elektrische Energie (Strom) als Energiequelle benötigen, werden elektrische Heizungen genannt. Wichtige Faktoren elektrischen-Infrarotheizungen sind die Oberflächentemperatur, Oberflächengröße und Oberflächenbeschaffenheit.

Elektrische-Infrarotheizungen auch Elektro- Heizstrahler genannt, lassen sich, abhängig von ihrer Oberflächentemperatur, in Niedertemperatur- und Hochtemperaturheizungen unterteilen [12]

#### Hochtemperatur- Infrarotheizungen

Hochtemperatur-Infrarotheizungen sind Heizstrahler mit Temperaturen über 200°C. Sie lassen sich, abhängig von ihren Wellenlängen und Temperaturbereich, als Infrarot- Hellstrahler und Infrarot-Dunkelstrahler unterscheiden (siehe Abbildung 6).

Eine Infrarot-Hellstrahler sendet Wärmestrahlung mit Temperaturen von über 900°C aus. Sein Strahlungsmaximum liegt im Infrarot-A (nahes Infrarot). Im eingeschalten Zustand dieses Heizkörpers sieht man die Heizelemente deutlich glühen. Bei Infrarot-Hellstrahlern besteht ein Risiko von Verbrennung oder Auslösen eines Brandes. Deshalb soll man bei der Verwendung des Heizgerätes Gefahren mit einem Berührungsschutz vermeiden [3]. Im Gegensatz zu Infrarot-Hellstrahler geben Infrarot-Dunkelstrahler eine Wärmestrahlung mit Temperaturen zwischen 300–900°C ab. Im Spektralbereich befindet sich dieser Heizkörper beim Infrarot- B (mittleres Infrarot). Die kurzen Wellenlängen gehören in den Bereich des sichtbaren Lichts und die Heizelemente glühen dunkelrot.



Abbildung 6: Einteilung der Elektro-Hochtemperatur-Infrarotheizung [21] [22]

Da die Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur und Infrarot-Hell- und Dunkelstrahlern sehr groß ist, können die von beiden Geräten abgestrahlten Wirkleistungen mit der Formel des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet werden (siehe Kapitel 2.2.1). Wichtig ist, dass bei den Heizgeräten nur die Vorderseite des Heizpaneels berücksichtigt wird [2].

#### Niedertemperatur- Infrarotheizung

Niedertemperatur- Infrarotheizung (Infrarotpaneel) sind sogenannte Dunkelstrahler ohne sichtbares Licht und gehören zur langwelligen Strahlung (Infrarot-C). Im Gegensatz zu Hochtemperatur-Infrarotheizungen kann die Niedertemperatur-Infrarotheizung nur eine Oberflächentemperatur von bis zu 200°C erreichen. Infrarotpaneele lassen sich, abhängig von ihrer Oberflächentemperatur, in Wand-Infrarotpaneele und Decken-Infrarotpaneele unterscheiden. Wie alle anderen Elektro- Heizungen werden sie mittels Stroms betrieben. In Abbildung 7 sind die zwei Arten dargestellt.



#### Abbildung 7: Einteilung der Elektro-Niedertemperatur-Infrarotheizungen [23]

Ein Deckeninfrarotpaneel wirkt wie die Sonne im Inneren des Raums. Sie verbreitet die Infrarotstrahlung bzw. Wärmestrahlung von oben herab in den Raum, wodurch alle Gegenstände wie Böden, Wände oder Decken, Möbel sowie lebende Organismen erwärmt werden. Die Luft erwärmt sich sekundär durch die Wärmeabgabe der Umgebungsflächen im Raum [24]. Die Oberflächen eines Deckeninfrarotpaneels kann eine Temperatur bis max. 200°C erreichen. Aufgrund dieser Temperatur sind die Deckeninfrarotpaneele im Wohnungsaufbau bzw. in Räumen mit niedrigen Deckenhöhen weniger zu empfehlen. Sie werden bevorzugt in großflächigen Räumen, z.B. in Fabrik-, Lager-, Sportund Ausstellungshallen, mit entsprechender Deckenhöhe eingesetzt. Die zulässige Oberflächentemperatur eines Deckeninfrarotpaneels hängt von der Deckenhöhe und der Einstrahlzahl ab [25]. Bei der Verwendung eines Deckeninfrarotpaneels sollte ein Abstand von mindestens einem Meter von der Höhe des menschlichen Kopfes eingehalten werden [1]. Ein Deckeninfrarotpaneel verteilt die Wärmestrahlung mit einem Strahlungsanteil über 70 % [26]. Da keine Luft bei der Infrarotheizung aufsteigt und erwärmt wird, fällt der Strahlungsanteil bei der Deckmontage höher als bei Wandmontage aus.

Wandinfrarotpaneele werden an Seitenwänden montiert und senden direkte angenehme Infrarotstrahlung, die auf Gegenständen, Personen oder festen Oberflächen direkt in Wärme umgewandelt wird. Die Oberfläche eines Wandinfrarotpaneels erwärmt sich im eingeschalteten Zustand auf ca. 80–120°C, und sein Strahlungsanteil liegt bei rund 60–70 %.

Für Bestimmung des Strahlungswirkungsgrads von Niedertemperatur-Infrarotheizung wurde eine Prüfprotokoll von der Technischen Universität Kaiserlautern erstellt. Diese Methode ist im Detail in [27] beschrieben. Wie sich die Strahlungswirkungsgrades für Niedertemperatur- Infrarotheizungen berechnen lassen, wird in Kapitel 2.3.2 dargestellt. Die Formel mit den Normen der PANEIA - Industriestands herausgegeben.

In den folgenden Kapiteln wird eine tiefergende Analyse des Wandinfrarotpaneels beschrieben.

#### 2.3.2 Strahlungswärmeverteilung bei Infrarotpaneelen

Während eine konventionelle Heizung die Umgebungsluft durch Konvektion erwärmt und auf dem Konvektionsprinzip beruht, sendet ein Infrarotpaneel im eingeschalteten Zustand durch seine Oberflächentemperatur die Wärmestrahlung im Raum aus. Wie in Abbildung 8 zu sehen, werden durch die Wärmestrahlung feste Gegenstände und Körper direkt erwärmt. Die erwärmten Körper und Gegenstände strahlen die Energie weiter, und so findet ein steter gegenseitiger Strahlungsaustausch statt. Die Fläche mit höher Temperatur gibt an Fläche mit geringer Temperatur Wärmeenergie durch Strahlung ab [17]. Strahlungsflächen in einem Raum sind nicht nur die Heizflächen der Wandheizung, sondern auch Wände, Decken, Möbel, Fenster, Türen sowie auch Menschen und Tiere. Das Raumklima beim Infrarotpaneel ist durch folgende thermische Struktur formuliert:

- Die Luft ist gleichmäßig warm.
- Die Raumflächen sind gleichmäßig warm.
- Die Flächen sind wärmer als die Luftschichten.
- Die durchschnittliche Differenz zwischen Luft und Flächentemperatur beträgt nur 1 bis 2°C [5].



Abbildung 8: Infrarotstrahlung in einem Raum [28]

Strahlungsaustausch geschieht dann, wenn die höher temperierte Fläche an die niedrig temperierte Fläche Wärmestrahlung abgibt. Wie Strahlungsaustausch in einem geschlossenen Raum stattfindet, zeigt das Beispiel zweier Teilflächen T<sub>1</sub> und T<sub>2</sub>, wobei T<sub>1</sub> die absolute Temperatur der Fläche1 und T<sub>2</sub> die absolute Temperatur der Fläche 2 beschreibt (siehe Abbildung 9) [17].

Fall (I): Der Strahlungsaustausch ist sehr groß, wenn die die Differenz zwischen  $T_1$  und  $T_2$  groß ist.

Fall (II): Der Strahlungsaustausch ist sehr klein, wenn die Differenz zwischen T1 und T2 klein ist.

Fall (III): Der Strahlungsaustausch ist null, wenn  $T_1$  und  $T_2$  gleich groß werden.

Anzumerken ist, dass sich die Strahlungsleistung einer temperierten Fläche nicht analog zum Strahlungsaustausch der temperierten Flächen berechnen lässt [17]. (siehe Kapitel 2.2.1)



#### Abbildung 9: Strahlungsaustausch zwischen zwei temperierten Flächen

Wie in Abbildung 9 zu sehen, lassen sich die Oberflächentemperaturen im Raum durch den Strahlungsaustausch angleichen. Dadurch sind die absorbierte und emittierte Wärmeenergie gleich groß. Die niedrige Differenztemperatur macht das Raumklima ausgewogen, weswegen man auch von

Behaglichkeitstemperatur spricht. Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, befindet sich die Behaglichkeitstemperatur bei einer Raumlufttemperatur ab 15°C und einer Wandtemperatur von 22°C (siehe Abbildung 1).

Die pro Fläche abgegebene Strahlungsleistung des abstrahlenden Elements hängt stark von der Temperatur des Heizelements ab. Da die Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur und Infrarotpaneel sehr gering ist, müssen die Raumumgebungsflächen berücksichtigt werden.

Für die Berechnung der Wärmestrahlung  $\bar{Q}_{Str.}$  wird die Formel der Strahlungsaustausch vereinfacht. Wärmestrahlung  $\bar{Q}_{Str.}$  lassen sich mit der Formel 2:7 berechnen [29].

$$\bar{Q}_{Str.} = A_1 \sigma \frac{c_S}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (T_1^4 - T_2^4)$$
2:7

wobei die Fläche  $A_2 = 1$  in Räumen ist.

Der Strahlungswirkungsgrad wird als das Verhältnis von Wärmestrahlung  $\bar{Q}_{Str.}$  und zugeführte elektrischer Leistung  $P_{el.}$  definiert und liegt immer bei weit unter 100 %. Er lässt sich mit der Formel 2:8 berechnen:

$$\alpha_{Str.} = \frac{\bar{Q}_{Str.}}{P_{el.}}$$
 2:8

Anzumerken ist, dass der Strahlungswirkungsgrad nicht mit dem elektrothermischen Wirkungsgrad oder der Energieeffizienz zu verwechseln ist, da der elektrothermische Wirkungsgrad im Vergleich zum Strahlungswirkungsgrad das Verhältnis von insgesamt abgegebener thermischer Leistung zur zugeführten elektrischen Leistung ist und immer bei 100 % liegt [29]. In Abbildung 10 ist die vereinfachte Methode für die Bestimmung der Strahlungsaustausch- und Strahlungswirkungsgrad-Formel und auch der Infrarotstrahler mit seiner Kenngrößen und Temperatur dargestellt [29].



Abbildung 10: Bestimmung des Strahlungswärmestroms und Strahlungswirkungsgrades [29], (eigene Darstellung)

## 2.4 Technischer Aufbau und Temperatursteuerung eines Infrarotpaneels

Eine Infrarotheizung ist in ihrem Aufbau und ihrer Funktion vergleichsweise einfach gegenüber anderen Heizungen. Der Aufbau eines Infrarotpaneels kann je nach Hersteller variieren. In Abbildung 11 ist der schematische Aufbau einer Infrarotheizung mit allen Bauteilen dargestellt.



Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Infrarotheizung [52] [30]

Grundsätzlich besteht ein Infrarotpaneel aus fünf wichtigen Bauteilen [30]:

#### 1. Gehäuse des Infrarotpaneels

Das Gehäuse eines Infrarotpaneels besteht aus Stahlblech und hat eine Front- und Rückseite. Die Bauteile eines einfachen Infrarotpaneels sind seitlich verschlossen und die Verbindungen sind sichtbar. Bei einem hochwertigen Infrarotpaneel sind rückseitig verschlossen, die Verbindungen sind dabei nicht zu sehen und die Vorderseite des Paneels geht in die Seitenflächen über. Grundsätzlich beträgt die Materialstärke des Stahlblechs 0,6–1,0 mm [30].

#### 2. Heizelement des Infrarotpaneels

Die Hauptaufgabe des Heizelements ist die Oberfläche des Infrarotpaneels Vorderseite möglichst schnell und mit möglichst geringem Einsatz elektrischer Leistung auf eine ideale Arbeitstemperatur zu bringen. Bei dem Heizelement des Infrarotpaneels wird elektrische Energie (Strom) in Wärme umgewandelt [30]. Die Heizschicht eines Infrarotpaneels ist aus Karbonfasern, Karbonfolie oder einzelnen Adern aus Edelstahlfilamenten aufgebaut. Dementsprechende Produkte verfügen über genügend Sicherheitsreserven und sind sehr langlebig [31].

#### 3. Halterung des Infrarotpaneels

Infrarotpaneele können an Wand oder Decke eines Raums platziert bzw. montiert werden. Die Halterungen sind konzipiert, dass ein Mindestabstand zur Decke oder Wand von etwa 15–20 mm eingehalten wird, um die nötige Belüftung von Hinten zu gewährleisten. Nicht jedes Infrarotpaneel ist für jede Montageart geeignet [30].

#### 4. Dämmung

Damit die Wärme nur in eine Richtung abgestrahlt wird, müssen Infrarotpaneele gut isoliert werden. Ein gutes Infrarotpaneel wird dadurch charakterisiert, dass eine Wärmestrahlung > 90 % nach vorn abgegeben kann. Bei Infrarotpaneelen wird ein Teil der Energie nach hinten/seitlich abgestrahlt [30]. Es wird ein Dämmmaterial in das Gehäuse des Infrarotpaneels eingebracht, um den Wärmeverlust an der Rückseite des Paneels zu minimieren. Die Rückseite des Infrarotpaneels wird aufgrund der Wärmeleitung ebenso erwärmt. Allerdings erfolgt an der Rückseite keine Wärmestrahlung, um Verluste zu vermieden [32].

#### 5. Abstrahlfläche

Die vordere Abdeckung (Frontplatte) eines Infrarotpaneels ist die Abstrahlfläche, die das wichtigste Bauteil einer Infrarotheizung dargestellt. Bei den meisten Infrarotpaneele wird die Oberfläche der Vorderseite beschichtet. Dies kann z.B. eine Lackierung, eine Pulverbeschichtung oder eine Mineralbeschichtung sein. Die Beschichtungen garantieren eine gute Strahlungsabgabe. Die Infrarotpaneele verfügen über spezielle Oberflächen. Dazu gehören z. B:

- Glas oder Spiegelheizungen (ESG): Glas erfordert eine höhere Oberflächentemperatur als eine Metalloberfläche mit Pulverbeschichtung, um eine gute Abstrahlleistung zu erreichen.
- Emailbeschichtung (keramisch beschichteter Stahl)
- Quarzsand (Thermoquarz)
- Natursteinplatte (Granit, Marmor, Sandstein)
- Tafelheizungen (Sonderlösungen aus keramisch beschichtetem Stahl mit Schiefer)

Laut der Norm EN60335- 2 ergibt sich eine zulässige Höchsttemperatur beim Wandinfrarotpaneel von 105°C bei beschichteten Heizelementen und 120°C bei Glasoberflächen [30].

#### Ein-/Ausschalt Funktion eines Infrarotpaneels

Wie in Kapitel 2.3.1.2 erwähnt, wird als Energiequelle elektrische Energie (Strom) benötigt, um das Infrarotpaneel einzuschalten. Die Regelung des Paneels erfolgt entweder manuell (Ein-/ Ausstecken) oder über ein automatisches Thermostat. Die Thermostate werden bei einer Nachrüstung meist zwischen Steckdose und Paneelstecker geschaltet, möglich ist aber auch ein direkter Anschluss an die Hauselektrik mit Einbindung einer zentralen Steuerungsstation für alle Paneele [2].

Eine Studie in [33] beschreibt die Reaktionsschnelligkeit der Oberflächentemperatur der Infrarotstrahlheizung und des Stellsignals des Thermostates. Mit dem Thermostat kann die Oberflächentemperatur des Infrarotpaneels geregelt werden und somit kann die gewünschte Raumtemperatur innerhalb von weniger Minuten erreicht werden. In Abbildung 12 ist zu sehen, wie die Oberflächentemperatur der Infrarotstrahlheizung innerhalb von weniger Minuten eine Temperatur von ca. 90°C erreicht hat.



Abbildung 12: Oberflächentemperatur von Infrarotheizung und Stellsignal des Thermostats [33]

#### 2.5 Infrarot- Heizanstrich

Ein Infrarot-Heizanstrich ist eine elektrisch leitende Farbe, die, während der Einschaltung der Bahnen des Heizanstrich, automatisch die Wärme verteilt. Die Bahnen des Heizanstrich werden an ein Schaltnetzteil elektronisch angeschlossen und betrieben. Heizanstriche senden ähnlich wie die Infrarotpaneele langewellige Strahlung (Infrarot-C) aus und erwärmen nicht die Luft, sondern die festen Gegenstände und Körper.

Heizanstriche können auch als Heizfarbe, Holzlack oder Heizvorrichtung bezeichnet werden. Sie bestehen aus einer Stoffmischung aus Carbonfasern und elektrisch leitfähigem Material und können auf Wand, Decke oder Fußboden aufgebracht werden. In Abbildung 13 kann man die schematische Darstellung einer Elektroinstallation des Heizanstrichs sehen. Im Vergleich zu Infrarotpaneelen kann der Heizanstrich nicht nur mit einer Netzspannung (230 V AC) in Betrieb genommen werden, sondern auch mit Niederspannung (24 V). Sollten die Heizanstriche mit einer Netzspannung in Betrieb genommen werden, werden dafür Transformatoren (230 V -24V) benötigt [34]. In Abbildung 14 ist die schematische Darstellung von Elektroinstallation und Schichtaufbaut einer Wandheizung mit der Heizfarbe e-paint dargestellt. Man sieht, dass die Steuerung der Infrarotheizung mit Raumthermostaten in den Räumen erfolgt. Bei einer sehr guten Raumdämmung benötigt der Heizanstrich eine Leistung von 30 W/m<sup>2</sup>, um die Wohnfläche ausreichend erwärmen zu können, wohingegen bei einer schlechten Raumdämmung dazu eine Leistung zwischen 80 bis 120 W/m<sup>2</sup> benötigt wird [35].



Abbildung 13: Schematischer Darstellung der Elektroinstallation des Heizanstrichs [34]



Abbildung 14: Schematische Darstellung der Elektro-Installation und Schichtaufbaut einer Wandheizung mit Heizfarbe e-paint [35]

Laut der Studie der Energie Steiermark [2] benötigt man für einen Milliliter Heizanstrich ca. 0,24 € und für einen Raumgröße 10 m<sup>2</sup> benötigt man 4 Liter Heizanstrich, womit Kosten von bis zu 960 € erreicht werden. Als Investitionskosten für die Verwendung des Heizanstrichs werden auch die Kupferbahnen, Transformatoren, Temperatursensoren und Thermostat berechnet [2]. Je besser der Raum gedämmt ist, desto niedriger sind die Heizkosten [36].

Welche Auswirkungen Heizanstriche auf die Gesundheit haben, welche Investitionskosten man für den Heizanstrich benötigt und welche Vor – und Nachteile bei Heizanstrich gibt, wird im Detail in [2] beschrieben.

#### 2.6 Wirkungsweise der Infrarotheizung bei den Menschen

#### 2.6.1 Allgemein

Elektromagnetische Wellen bestehen aus Photonen bzw. Lichtteilchen. Im Vergleich dazu wird das elektrische Feld von elektrischen Ladungen erzeugt. Wenn sich diese Ladungen bewegen, spricht man von einem Magnetfeld. Wenn Strom fließt, erzeugen elektrische Geräte und Leitungen elektrische und magnetische Felder [37].

Die Ursache von elektrischen Feldern ist elektrische Spannung, die zwischen unterschiedlich geladenen Körpern auftritt. Im Haushalt entstehen elektrische 50 Hz-Wechselfelder durch Elektroinstallationen, Elektroheizungen und elektrische Geräte. Gemäß Univ.- Prof. N. Leitgeb können Elektrogeräte hohe elektrische Feldstärken bis hin zur 11-fachen Überschreitung des Referenzwertes verursachen [38]. In einem homogenen Feld ergibt sich die elektrische Feldstärke direkt aus Potenzialdifferenz (in Volt) und dem Abstand zweier Äquipotenziallinien und lässt sich mit der Formel 2:9 berechnet [37]:

$$E = \frac{U}{a}$$
 2:9

Die Einheit der elektrischen Feldstärke *E* ist Volt pro Meter, V/m.

Die Spannung ist die Voraussetzung dafür, dass elektrischer Strom fließen kann, wenn ein Gerät eingeschaltet wird. Fließt durch ein Gerät Strom, so entsteht in der Umgebung des Geräts ein magnetisches Feld. Im Haushalt entstehen die Magnetfelder dort, wo der Strom verbraucht wird. Gemäß Univ.- Prof. N. Leitgeb können Magnetfelder in der Nähe von Elektrogeräten sehr hoch werden und den Referenzwert bis zu 80-fach überschreiten. Die stärksten Magnetfelder erzeugen Geräte mit Elektromotoren, z.B. Küchengeräte und Elektrowerkzeuge [38]. Die magnetische Feldstärke H lässt sich mit der Formel 2:10 berechnet:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$
 2:10

Die Einheit der magnetischen Feldstärke H ist Amper pro Meter A/m. Zur Beschreibung von Magnetfeldern wird auch die magnetische Induktion oder magnetische Flussdichte B verwendet, die über die Materialkenngröße Permeabilität  $\mu = \mu_0 \mu_r$  mit der magnetischen Feldstärke H verknüpft ist. Die magnetische Flussdichte *B* lässt sich mit der Formel 2:11 berechnen.

$$B = \mu_0 H \qquad \qquad 2:11$$

Die Einheit der magnetischen Flussdichte *B* ist Tesla *T*, wobei  $1 T = 1 Vs/m^2$  ergibt [37].

Wie in Abbildung 15 zu sehen, breiten sich elektrische und magnetische 50 Hz- Felder wie auch elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit aus. Ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld verursacht ein ebenso zeitlich veränderliches magnetisches Feld und umgekehrt.



Abbildung 15: Elektrische und magnetische Felder [37]

Das Spektrum der elektromagnetischen Felder bzw. Wellen umfasst neben den nieder- und hochfrequenten Feldern Frequenzen von 0 bis 300 GHz. Elektrische und magnetische Felder werden ab 9 bis 30 kHz gekoppelt und als elektromagnetische Felder betrachtet. Je höher die Frequenz, umso stärker ist die Kopplung und umso kleiner ist die Wellenlänge [37].

Grundsätzlich kann das Gebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in zwei Themenbereiche strukturiert werden:

- Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Organismen, insbesondere auf den Menschen und
- elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln [39].

#### 2.6.2 Wirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen

Die elektromagnetischen Felder werden hauptsächlich durch ihre Frequenz charakterisiert. Es gibt elektromagnetisch niederfrequente Felder (0 Hz bis 30 kHz) und hochfrequente Felder (30 kHz bis 300 GHz). Für beide Frequenzbereiche sind vorsorglich Grenzwerte definiert worden [39].

Wie in Abbildung 16 zu sehen, sind unsere Körperzellen wie eine kleine elektrische Batterie. Der menschliche Körper ist voller Elektrizität und elektrischer und magnetischer Felder. Elektrische und magnetische bzw. elektromagnetische Felder beeinflussen den menschlichen Organismus. Sie verursachen Ladungsverschiebungen im Inneren des Körpers [38].



Abbildung 16: Die Wirkung des elektrischen Feldes auf dem Menschen [40], (eigene Darstellung) Das elektrische Feld im Inneren des Körpers ist kleiner als das äußere elektrische Feld. Körperinnere Feldstärke können durch eine gute Polarisierbarkeit der Körperoberfläche sehr gut gegen äußere (niederfrequente) elektrische Feld abgeschirmt werden [40]. Laut [41] liegen elektrische Felder mit einer Frequenz von 50 Hz im Alltag bei 100 V/m, und für die allgemeine Bevölkerung ergibt sich ein gültiger Referenzwert von 5 kV/m.

In Abbildung 17 sind zwei Fälle von Menschen im magnetischen Feld dargestellt. Unter der Annahme gleicher Flussdichte sind in Fall 2 höhere Wirbelstromdichten zu erwarten als in Fall 1. Bei 50 Hz und 40 bis 75  $\mu$ T erhält man eine Stromdichte von ca. 0,5 mA/m<sup>2</sup>.



Abbildung 17: Die Wirkung des magnetischen Feldes auf den Menschen [40]

Laut den Normen in Kapitel 3.2 ergibt sich für das magnetische Feld mit einer Frequenz 50 Hz ein Referenzwert von 100  $\mu$ T, und für die allgemeine Bevölkerung ergibt sich ein gültiger Referenzwert von 200  $\mu$ T.

## **3 Grenzwerte laut betroffener Normen**

In Österreich sind die Grenzwerte in der Norm ÖVE/ÖNORM festgelegt und definieren den Stand der Technik. Im Folgenden werden betroffenen Normen der Infrarotheizung dargestellt und zusammengefasst.

## 3.1 Normen für die Messung und Berechnung der Infrarotheizung nach PANEIA-Industriestandard.

In Tabelle 2 sind Normen dargestellt, die den elektrischen Haushalt und das Direktheizgerät betreffen. Sie wurden von der PAN European Infrared Alliance (PANEIA) unter Mitwirkung externer Experten erstellt, und haben den Status eines Industriestandards. Die Normen sind am 14.11.2014 veröffentlicht worden und erlangten mit diesem Datum ihre Gültigkeit. Die Industriestandards, die in der Tabelle 2 zu sehen sind, werden dem deutschen Normungsausschuss DKE beim VDE/DKE im Rahmen der Überarbeitung der Europäischen Norm EN: 1995 zur Kenntnis vorgelegt [12] [42][43].

Nr.	Elektrisches Haushaltsdirektheizgerät Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaften					
	PANEIA		Ausgabe			
1.	EN 60675-1	Teil 1: Begriffe, Symbole und Einheiten, CE- Kennzeichnung	14.11.2014			
2.	EN 60675-2	Teil 2: Prüfverfahren für Elektrokonvektionsheizgeräte	14.11.2014			
3.	EN 60675-3	Teil 3: Prüfverfahren für Elektrohybridheizgeräte und Elektroniedertemperatur-Infrarotheizungen	14.11.2014			
4.	EN 60675-4	Teil 4: Prüfverfahren für Elektro-Hochtemperatur-Infrarotheizungen	14.11.2014			

Tabelle 2: Allgemeine Normen nach der PANEIA- Industriestandart für die Infrarotheizungen

Im Folgenden werden Punkte erwähnt, die für die Messung der Infrarotpaneele, die Berechnung des Strahlungswärme-Wirkungsgrads und den Anwendungsbereich von Infrarotheizungen relevant sind. Laut der Normen in Tabelle 2 werden Heizgeräte sich in vier verschiedene Arten unterschieden:

- Elektrokonvektionsheizgeräte
- Elektrohybridheizgeräte
- Elektroniedertemperatur- Infrarotheizungen
- Elektrohochtemperatur- Infrarotheizungen.

Elektrokonvektionsheizgeräte können eine aktive Strahlungswärmeoberfläche haben. Sie haben jedoch einen Strahlungswärme-Wirkungsgrad von 20 %. Im Vergleich dazu hat die Niedertemperatur-Infrarotheizung einen Strahlungswärme-Wirkungsgrad von 40 %. In Tabelle 3 werden Wand- und Deckenbefestigung von Infrarotheizungen nach Güteklassen eingeteilt dargestellt. Die Oberflächentemperatur einer Niedertemperatur-Infrarotheizung kann eine aktive Strahlungswärmeoberfläche zwischen 40°C und 200°C haben.

Elektro- Niedertemperatur-Infrarotheizung – Wandbefestigung, Bodenaufstellung									
Mittlere Strahlungstemperatur	40°C bis 100°C			100°C bis 150°C			150°C bis 200°C		
Strahlungswärme-Wirkungsgrad	46 % und >	43 % < 46%	40 % < 43%	48 % und>	45 % < 48 %	40 % < 45 %	50 % und >	47 % < 50 %	40 % < 47 %
Güteklassen- Einteilung	***	**	*	***	**	*	***	**	*

Tabelle 3: Elektro-Niedertemperatur- Infrarotheizung – Wandbefestigung, Bodenaufstellung

## 3.2 Normen für Sicherheit der Personen von elektromagnetischen Feldern und Sicherheit elektrischer Haushaltgeräte

Wie die Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Menschen sind, und welche Beeinflussung elektromagnetische Felder haben, wurde in Kapitel 2.6 dargestellt. Da bei der Anwendung der Infrarotpaneel die Sicherheit der Personen in elektromagnetischen Feldern von entscheidender Bedeutung ist, und da es bis heute noch keine bestimmten Normen für die Anwendung von Infrarotpaneelen gibt, wurden im Rahmen dieser Arbeit Normen gesucht, die bei der Messung elektromagnetischer Felder (EMF/EMV) und der Messung der Oberflächentemperatur der Infrarotpaneele (Vorderseite und Rückseite) dienlich sein können.

In den Tabellen der folgenden Kapitel sind diese Normen dargestellt.

Die Norm in Tabelle 4 beschreibt die Verfahren zur Messung der elektromagnetischen Felder von Haushaltgeräten und ähnlichen Elektrogeräten im Hinblick auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern.

Nr.	Verfahren zur N	lessung der ele äł	ktromagnetischen Felder von Haushaltsgeräten und Inlichen Elektrogeräten
	OVE/ÖNORM	Ausgabe	Hinblick
1.	EN 62233	01.01.2009	Sicherheit der Personen in elektromagnetischen Feldern

Tabelle 4: Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern

Für die Messung der elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder für einen Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 Ghz gelten die in Tabelle 5 dargestellte Referenzwerte. Die Norm zeigt, dass der effektive Wert der Stromdichte in einem Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 1000 Hz einen Wert von 2 mA/m<sup>2</sup> erreichen darf. Die Grenzwerte in Tabelle 5 kann man als Referenzwert für die Messung der magnetischen Flussdichte verwenden. Laut dieser Norm kann eine Messung der magnetischen Flussdichte im Zeitbereich unabhängig vom Signaltyp durchgeführt werden.

Tabelle 5: Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (0 Hz bis 300 GHz, ungestörte Effektivwerte) [44]

Frequenzbereich	E-Feldstärke	H-Feldstärke	B-Feld	Äquivalente Leistungsdichte der ebenen Welle S eq
	V/m	A/m	μТ	W/m²
0 Hz bis 1 Hz	-	3,2 × 10 <sup>4</sup>	4 × 10 <sup>4</sup>	-
1 Hz bis 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	-
8 Hz bis 25 Hz	10 000	4 000 / f	5 000 / f	-
0,025 kHz bis 0,8 kHz	<b>250</b> / f	<b>4</b> / f	5 / f	-
0,8 kHz bis 3 kHz	250 / f	5	6,25	-
3 kHz bis 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 MHz bis 1 MHz	87	0,73 / f	0,92 / f	-
1 MHz bis 10 MHz	87 / f <sup>½</sup>	0,73 / f	0,92 / f	-
10 MHz bis 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 MHz bis 2 000 MHz	1,375 f <sup>1</sup> ⁄ <sub>2</sub>	0,003 7 f <sup>1/2</sup>	0,004 6 f <sup>1/2</sup>	f/ 200
2 GHz bis 300 GHz	61	0,16	0,20	10
f ist, wie angezeigt, in der	Spalte der Frequenzber	eich.		

Die Normen 1-3 in Tabelle 6 werden für allgemeine Sicherheitsanforderungen für elektrische Haushaltsgeräte mit einer Nennspannung von nicht mehr als 250 V bei Einphasenwechselstrom verwendet. Die Norm 4-5 in der Tabelle 6 stellen die Begrenzung von Spannungsänderungen und Spannungsschwankungen vor und Flicker in öffentlichen Niederspannungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom bis zu 16 A je Leiter.

Tabelle 6: Norm, die sich mit allgemeiner Anforderung an elektrische Haushaltgeräte, und ähnliche Anwendungen befasst.

Nr.	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)					
	OVE/ÖNORM	-	Ausgabe	Hinblick		
1.	EN 55014-1	Teil 1: Störaussendung	01.09.2018			
2.	EN 55014-2/AC	Teil 2: Störfestigkeit- Produktfamiliennorm	01.04.2017	Anforderung an Haushaltgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte Grenzwerte für Oberschwingungsströme		
3.	EN 55014-2	Teil 2: Störfestigkeit- Produktfamiliennorm	01.02.2016			
4.	EN 61000-3-2	Teil 3-2: Grenzwerte	01.04.2015			
5.	EN 61000-3-3	Teil 3-3: Grenzwerte	01.04.2014	(Gerät-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter)		

Laut Norm Nr. 4 in Tabelle 6 dürfen bei Geräten der Klasse A die Oberschwingungen des Eingangsstromes die die in Tabelle 7 angegeben Werte nicht überschreiten. Die Geräte der Klasse A sind folgendermaßen klassifiziert:

- symmetrische dreiphasige Geräte;
- Haushaltgeräte, ausgenommen PC, Monitor, Kühlgeräte;
- Elektrowerkzeuge, ausgenommen tragbare Elektrowerkzeuge;
- Beleuchtungsregler (Dimmer) für Glühlampen;
- Audio-Einrichtungen.

Tabelle 7: Grenzwerte der Oberschwingungsströme	e für Geräte der Klasse A [45
---	-------------------------------

Oberschwingungsordnung	Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes				
п	А				
Ungeradzahlige O	berschwingungen				
3	2,30				
5	1,14				
7	0,77				
9	0,40				
11	0,33				
13	0,21				
$15 \le n \le 39$	0,15 × 15/ <i>n</i>				
Geradzahlige Oberschwingungen					
2	1,08				
4	0,43				
6	0,30				
$8 \le n \le 40$	0,23  imes 8/n				

In Tabelle 8 sind die Normen für Sicherheit elektrischer Geräte bzw. Schutz der Geräte gegen Gefahr elektrischer, mechanischer und thermischer Art sowie Brand- und Strahlungsgefahren dargestellt.

Nr.	Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke			
	OVE/ÖNORM		Ausgabe	
1.	EN 60335-1/A13	Teil 1: Allgemeine Anforderung	01.08.2018	
2.	EN 60335-1/AC	Teil 1: Allgemeine Anforderung	01.05.2014	
3.	EN 60335-2-30	Teil 2-30: Besondere Anforderungen für Raumheizgerät	01.03.2013	
4.	EN 60335-1	Teil 1: Allgemeine Anforderung	01.11.2012	

Tabelle 8: Die betroffenen Normen zum Schutz der Infrarotpaneel

Bei der Norm Nr. 3 in Tabelle 8 ergeben die Grenzwerte der maximalen Temperaturerhöhungen je nach Oberflächen wie folgt:

- 85°C bei metallischen Oberflächen
- 100°C bei Oberflächen aus Keramik, Glas oder ähnlichem Werkstoff
- 105°C bei Oberflächen aus Presswerkstoff

Bei Heizgeräten mit einer Netzanschlussleitung darf die Länge der Netzanschlussleitung nicht weniger als 1 m und nicht mehr als 1,9 m betragen.
Gemäß Norm Nr. 4 in der Tabelle 8 müssen die Wandmontage Heizgeräte mindestens 1,8 m über dem Fußboden montiert werden. Die Norm besagt auch, dass bei ortsfesten Strahlungsheizgeräte mit sichtbar glühenden Heizelementen und Geräten mit Wärmelampe zur Deckenmontage vor der möglichen Gefahr der Anbringung in der Nähe von Vorhängen und anderen benennbaren Materialen gewarnt werden muss. Die Heizgeräte, die in Badezimmern verwendet werden, sind so anzubringen, dass Schalter und andere Regler nicht von Menschen berührt werden können.

Die Norm zeigt auch, wie groß der Bemessungsstrom bei normaler Betriebstemperatur sein darf. Für alle Gerätearten darf der Bemessungsstrom 0,2 A nicht überschreiten. Für Wärmegeräte und kombinierte Geräte darf der Bemessungsstrom maximal 1 A erreichen. (siehe Tabelle 9).

Geräteart	Bemessungsstrom A	Abweichung
Alle Geräte	≤ <b>0</b> , <b>2</b>	+ 20 %
Wärmegeräte und	> 0,2 und ≤ 1,0	± 10 %
kombinierte Geräte	> 1,0	+ 5 % oder 0,10 A (je nachdem, welcher Wert größer ist)
		– 10 %

Tabelle 9: Abweichung der Stromaufnahme

### 3.3 Normen für elektrische Niederspannungsanlage

Die in Tabelle 10 dargestellte Norm umfasst die Sicherheitsvorschriften für elektrische Niederspannungsanlagen. Die Norm hat den Status einer nationalen elektrotechnischen Norm gemäß ETG 1992.

Tabelle 10: Einhalten der Richtlinien der Niederspannungsanlagen

NI.	Elektrische N	liederspannungsanlagen
Nr.	OVE	Ausgabe
1.	E 8101	01.01.2019

Gemäß der Norm in Tabelle 10 muss bei der Verwendung einer Deckenheizung mit Flächenheizelement der Bemessungsfehlerstrom der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD)  $I_{\Delta n} \leq 0.03$  A betragen.

# 4 Laboraufbau zur elektrotechnischen Evaluierung von Infrarotpaneelen

In diesem Kapitel wird der für die praktischen Untersuchungen eingesetzte Prüfaufbau erklärt. Dabei wird auf die Auswahl der Infrarotpaneele für die praktische Untersuchung, Messaufbau, Messdaten und Messauswertung und eine Zusammenfassung aus dem Projektbericht eingegangen.

Die Messungen der Infrarotpaneele wurden im Labor von Herrn Dipl.-Ing. Mike Alexander Lagler (IEAN) und Herrn Rizvanaj Valon, B.Sc durchgeführt. Die Messdaten wurden im Rahmen eines Projektberichts am IEAN ausgewertet. Diese Messergebnisse werden in Kapitel 4.3 zusammengefasst dargestellt [46].

### 4.1 Auswahl der Infrarotpaneele für die praktische Untersuchung

Vor dem Beginn der Messungen der Infrarotpaneele, wurde im Sommer 2019 zuerst eine Marktrecherche der im Internet frei zugänglichen Preise von Infrarotpaneelen durchgeführt. Dabei sind 381 verschiedene Infrarotpaneele von unterschiedlichen Herstellern mit verschiedenen Investitionskosten ausgewertet worden. Davon wurden sechs verschiedene Infrarotpaneele von fünf verschiedenen Herstellern ausgewählt, die dann vom Institut der elektrischen Anlagen und Netze erworben wurden. In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die ausgewählten Infrarotpaneele mit ihren technischen Daten nach Herstellerangaben sowie den Preisvergleich diesen Infrarotpaneelen von Sommer 2019 und 2021 dargestellt. Diese sechs ausgewählten Paneele unterscheiden sich nach Größe, Material, Aufbau und Montageart. Anzumerken ist, dass der Hersteller easyTherm und D4H im Jahr 2022 keine Preise für die Paneele des Typs "comfort soft 1000" und "500S/C" zu Verfügung gestellt haben.

Horotollor	Turn	Montogo	Oberf	äche	Sobutz	Link
Heistellei	тур	Montage	Frontseite	Rückseite	Schutz	LITK
easyTherm GmbH	comfort soft 1000	Wand und Decke	Spezial Keramik	Edelstahl	IP46	www.easy- therm.com
Elitec Elektrotechnik Handelsges.m.b.H.	Performance 450P	Wand und Decke	Pulverbes	chichtung	IP44	www.elitec.at
D4H -Produktions gesellschaft GmbH	500S/C	Wand und Decke	Grevelly snow	Grevelly snow	IP40	www.eco-hot.com
Fenix Group a.s.	Ecosun GS 500	Wand und Decke	Glas	-	IP44	www.fenixgroup.cz
Fenix Group a.s.	GR 500	Wand	Glas	-	IP44	www.fenixgroup.cz
Könighaus GmbH	P-Serie	Wand	-	-	IP44	www.koenighaus- heizsysteme.de

Tabelle 11: Wissenschaftliche Untersuchung der Infrarotpaneele [46]

			Technische Daten laut Herstellerangaben								
		Elektrische Nennleistung	Fläche		Gewicht	Preis (Stand	Preis (Stand				
Hersteller	Тур	Р	A m <sup>2</sup> H x L (mm x mm)		т	Sommer 2019 exkl. 20% MwSt.)	Sommer 2022 exkl. 20% MwSt.)				
		W			kg	€	€				
easyTherm	comfort soft 1000	500	0,59	606 x 976	12,0	974,00	-				
Elitec	Performance 450P	450	0,53	892 x 592	8,3	257,88	338,44				
D4H	500S/C	500	0,48	800 x 600	2,3	468,00	-				
Fenix	Ecosun GS 500	500	0,48	1200 x 400	10,8	325,04	284,95				
Fenix	GR 500	500	0,54	900 x 600	21,0	555,83	494,00				
Könighaus	P-Serie	600	0,48	1006 x 606	-	248,75	119,90				

Tabelle 12: Technische Daten und Preis ausgewählter Infrarotpaneele

### 4.2 Messungen an ausgewählten Infrarotpaneelen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Untersuchung der zuvor aufgelisteten Infrarotpaneele gemäß dem in Abbildung 18 dargestellten Messaufbaus im Labor des Instituts der elektrischen Anlagen und Netze durchgeführt.

Wie in Kapitel 1.2 erwähnt, werden die elektrischen Parameter (Strom, Spannung, Leistung) mittels Energie- und Power-Quality-Analysen, ebenso wie die elektromagnetischen Felder und die Oberflächentemperatur der Paneele (Vorderseite und Rückseite) gemessen. Die Vorgangsweise der durchgeführte Messung ist im Detail in [46] beschrieben.



Abbildung 18: Messaufbau der Infrarotpaneele [46]

#### 4.3 Messdaten und Messauswertung

In der Folge werden die Messdaten und Messauswertungen der elektrischen Messung, elektromagnetischen Messung, Wärmestrahlungs- und Temperaturmessungen, Strahlungsleistung und Strahlungswirkungsgrad dargestellt.

#### 4.3.1 Elektrische Messung

#### 4.3.1.1 Versuchsaufbau

Bei diesem Aufbau werden Strom und Spannung, sowie elektrische Leistungen gemessen. Die Messungen sind mit dem Power Analyzer (Fabrikat DEWETRON) durchgeführt worden. Die Messdaten der elektrischen Spannung sowie des elektrischen Stroms werden einerseits durch den Power Analyzer ausgegeben und andererseits gleichzeitig im lokalen Gerätespeicher abgelegt. Leistungsfaktor  $\lambda$  beschreibt das Verhältnis der Wirkleistung und Scheinleistung ( $\lambda$ =P/S) und liegt zwischen den Wert 0 und 1. Leistungsfaktor  $\lambda$  wird ebenso mit dem Power Analyzer (Fabrikat DEWETRON) gemessen.

Zusätzlich werden die THD<sub>U</sub>-Werte untersucht. Dafür wird das Gerät im Power-Hardware-in-the-Loop-Labor (PHIL-Lab) verwendet. Es weist im Leerlauf einen THD<sub>U</sub>-Wert (Total Harmonic Distortion) zwischen 0,35 bis 0,37 % bei 240 V<sub>rms</sub> auf. Ebenso werden mögliche Oberschwingungsströme durch das Infrarotpaneel überprüft. Dafür wurden die Normen Nr. 4 aus Tabelle 6 berücksichtigt. In Abbildung 19 sieht man, wie die Messungen dieses Versuchs durchgeführt worden sind [46].



Abbildung 19: Aufbauplan für elektrische Messung und Wärmestrahlungs- und Temperaturmessung von Infrarotpaneelen.

#### 4.3.1.2 Messergebnisse

In Tabelle 13 sind die Messergebnisse elektrischer Messungen von allen sechs ausgewählten Infrarotpaneele aufgeführt. Es wurden die Leistungsaufnahme  $\overline{P}$ , die spezifische Leistung  $\overline{P'}$ , die Leistung bei Beharrungstemperatur  $P_{Beharr.}$ , die THD<sub>U</sub> und der Leistungsfaktor  $\lambda$  in Abhängigkeit der

Aufheizzeit  $t_{Heizen}$  gemessen. Im Anhang dieser Arbeit bzw. in Kapitel 8.1 (Abbildung 28 bis Abbildung 36) sind die Messergebnisse von den gemessenen elektrischen Leistungen der Infrarotpaneele und der zeitliche Verlauf der gemessenen Spannung und des Stromes dargestellt [46].

		Elektrische Messdaten								
			Gemessen							
Hersteller	Ture	$\overline{P}$	$\overline{P'}$	PBeharr.	λ	THD∪	tHeizen			
	тур	W	W/m <sup>2</sup>	W	_	%	min			
easyTherm	comfort soft 1000	494,60	826,2	504,3	0,9999	0,306	64			
Elitec	Performance 450P	430,00	821,9	431,8	0,9997	0,353	38			
D4H	500S/C	208,17	433,7	402,0		0,358	33			
Fenix	Ecosun GS 500	501,80	1045,4	491,5	0,9999	0,349	74			
Fenix	GR 500	486,00	900,0	480.6	0.9999	0,346	126			
Könighaus	P-Serie	562,10	922,0	557,3	0,9998	0,333	51			

Tabelle 13: Elektrische Messdaten der Infrarotpaneele

#### 4.3.1.3 Diskussion

Die elektrischen Messwerte eines Infrarotpaneels wurden so lange aufgezeichnet, bis die Oberfläche des Paneels seine maximale Temperatur erreicht hat. In Tabelle 13 sind die Werte der Leistung im Beharrungszustand von den sechs untersuchten Infrarotpaneelen zu sehen.

Am schnellsten ist die Beharrungstemperatur während der Messungen des Infrarotpaneels "D4H 500S/c" erreicht worden. In der 33. Minute der elektrischen Messungen wurde bei einer Leistung von 402 W der Beharrungszustand erreicht. Anzumerken ist, dass das Infrarotpaneel "D4H 500S/c" eine interne Regelung implementiert hatte, welches im Nulldurchgang der Spannung ganz schnell ein- und ausschaltete (siehe das Diagramm im Anhang in Kapitel 8.1). Während der Messungen des Infrarotpaneels "Fenix GR 500" wurde die Beharrungstemperatur am spätesten (in der 126. Minute) erreicht. Im Anhang in Kapitel 8.1 sind die Diagramme des elektrischen Wirkleistungsbedarfs P in Abhängigkeit der Zeit sowie die Diagramme mit dem Verlauf der gemessenen Spannung und des Stromes dargestellt. Bei diesem Diagramm sieht man, dass zwischen Strom- und Spannungsverlauf keine Phasenverschiebung aufgetreten ist, wodurch zu erkennen ist, dass keine Blindwiderstände während der Untersuchung der Infrarotpaneele vorhanden sind. Während der Messung der Infrarotpaneele, hat der Leistungsfaktor  $\lambda$  einen Wert zwischen 0,9997 und 0,9999 erreicht. Die THD<sub>U</sub>-Messwerte sind in der Tabelle 13 dargestellt. Diese Messwerte wurden mit den Werten des Leistungsverstärkers im Leerlauf verglichen, und somit erkennt man, dass bei allen untersuchten Infrarotpaneelen keine wesentliche Netzrückwirkung festgestellt werden könnten. Die Grenzwerte der Oberschwingungsströme wurden mit den Grenzwerten der Normen Nr. 4 aus der Tabelle 6 überprüft. Es gab keine Überschreitung der Grenzwerte.

Bei allen überprüften Infrarotpaneelen sind keine Mängel aufgetreten. Während der elektrischen Messungen sind Sie zerstörungsfrei untersucht worden [46].

#### 4.3.2 Messung der elektromagnetischen Felder

#### 4.3.2.1 Versuchsaufbau

Die Messungen der elektromagnetischen Felder wurden bei allen Infrarotpaneele durchgeführt.

In Abbildung 20 sieht man, wie die Messungen der elektromagnetischen Felder mit einem Datenlogger NFA 1000 durchgeführt worden sind. Für das Gerät Datenlogger NFA 1000, das über einen Zeitraum von Minuten (Auflösung: Zehntelsekunden) misst, hat man eine Halterung benutzt, damit während der Messungen ein Abstand von 1000 mm und 200 mm zum Infrarotpaneel gehalten werden konnte. Es wurden die elektromagnetische Felder gemessen, die zwischen dem Infrarotpaneel und dem Datenlogger NFA 1000 aufgetreten sind.



Abbildung 20: Messung der elektromagnetische Felder mittels Datenlogger NFA 1000 [46].

Wie in Abbildung 21 zu sehen, werden die elektromagnetischen Felder mit dem ESM- 100- 3D-Feldgerät gemessen. Die Messungen werden in einem Abstand von 100 mm an neun verschiedenen Messpunkten am Infrarotpaneel durchgeführt, um am Ende den Mittelwert daraus zu bilden [46].



Abbildung 21: Messung der elektromagnetischen Felder mittels ESM-100 3D-Feldmessgerät [46].

#### 4.3.2.2 Messergebnisse

Tabelle 14 zeigt die Messwerte der gemessenen mittleren magnetische Flussdichte *B* an allen Infrarotpaneelen. Diese Messungen sind mittels des ESM-100 3D-Feldmessgeräts durchgeführt worden.

	Messwerte der magnetischen Flussdichte B											
Hersteller	easyTherm	Elitec	D4H	Fenix	Fenix	Könighaus						
Тур	comfort soft 1000	Performance 450P 500S/C		Ecosun GS 500	GR 500	P-Serie						
Nr.		Β [μΤ]										
1	0,27	1,02	1,86	1,7	2,22	0,73						
2	0,36	1,33	1,45	2,73	1,73	1,85						
3	0,52	1,18	1,6	3,19	3,23	4,17						
4	0,79	1,38	1,11	4,24	5,03	1,80						
5	0,54	1,91	1,63	2,88	1,47	1,93						
6	0,42	1,39	1,47	2,59	5,09	1,72						
7	0,39	1,77	2,15	3,13	2,72	0,68						
8	0,37	1,45	2,04	2,25	1,77	1,54						
9	0,43	2,03	2,13	1,86	1,93	2,70						

In Tabelle 15 werden die Messwerte der magnetischen Flussdichte  $\overline{B}_{aus}$  (Infrarotpaneel ausgeschaltet), die magnetische Flussdichte  $\overline{B}_{1000}$  (1000 mm Abstand zwischen NFA 1000 und Infrarotpaneel) und die magnetische Flussdichte  $\overline{B}_{200}$  (200 mm Abstand zwischen NFA 1000 und Infrarotpaneel) dargestellt. Diese Messungen sind mittels NFS- Datenlogger durchgeführt worden. Im Anhang dieser Arbeit bzw. in Kapitel 8.2 (Abbildung 34 bis Abbildung 39)sind grafische Messergebnisse von der Messung der magnetischen Felder bei allen untersuchten Infrarotpaneelen zu sehen [46].

	Di	Die gemessenen mittleren magnetischen Flussdichten										
Hersteller	easyTherm	Elitec	D4H	Fenix	Fenix	Könighaus						
Тур	comfort soft 1000	Performance 450P	500S/C	Ecosun GS 500	GR 500	P-Serie						
$\overline{B}_{aus}$	0,0046 µT	0,0072 µT	0,0057 µT	0,0048 µT	0,0038 µT	0,0061 µT						
<b>B</b> 1000	0,0164 µT	0,0156 µT	0,0365 µT	0,1192 µT	0,0219 µT	0,0893 µT						
<b>B</b> 200	0,2373 µT	0,7284 µT	0,3798 µT	1,2144 µT	0,7478 µT	1,1313 µT						

Tabelle 15: Messwerte der magnetischen Flussdichten

#### 4.3.2.3 Diskussion

Basierend auf der ICNIRP- Referenzwerte [47] wird ein Referenzwert der magnetischen Felder von 200  $\mu$ T empfohlen. Bei den Messdaten in Tabelle 14 und in Tabelle 15 sieht man, dass die Messdaten unter dem Referenzwert liegen.

# 4.3.3 Wärmestrahlungs- und Temperaturmessungen an den Paneelen (Vorderseite und Rückseite)

#### 4.3.3.1 Versuchsaufbau

Bei diesem Messaufbau werden die Wärmstrahlungs- und Temperaturmessungen der Aufheizzeit und Abkühlzeit der Infrarotpaneele durchgeführt. Wie in Abbildung 19 zu sehen, werden mit einer Wärmebildkamera die Wärmestrahlung und Temperatur der Infrarotpaneelvorderseite und rückseite gemessen. Die Messungen werden mit Hilfe von 12 Temperatursensoren durchgeführt. In Kapitel 8.3 (Abbildung 40 bis Abbildung 45) ist zu sehen, wie die Temperatursensoren an verschiedenen Positionen montiert wurden. Welche Aufgabe die Temperatursensoren T1 bis T12 haben, kann man in Tabelle 16 sehen [46].

Temperatursensoren	Position der Temperatursensoren	Aufgabe der Temperatursensoren
T1, T2	IR- Paneel- Vorderseite	Messung der maximalen Oberflächentemperatur
T3, T6, T9	IR-Paneel- Rückseite	Messung der Oberflächentemperatur der IR-Paneel- Rückseite
T4, T7, T10	Raum zwischen IR- Paneel und Gipskartonwand	Messung der Oberflächentemperatur der IR-Paneel- Rückseite
T5, T8, T11	Gipskartonwand	Messung der Temperatur an der Gipskartonwand
T12	Umgebung	Messung der Umgebungstemperatur

Tabelle 16	6 Temperatursensoren	und ihre Aufgaben
------------	----------------------	-------------------

#### 4.3.3.2 Messergebnisse

In Tabelle 17 sowie in Abbildung 40 bis Abbildung 45 sind die Messergebnisse der wärmtechnischen Messungen dargestellt. Zuerst wurden wärmetechnische Messungen, während der Aufheizzeiten bis das Infrarotpaneel seine maximale Temperatur erreicht hat, durchgeführt. Danach wurde das Infrarotpaneel abgeschaltet, wobei mit einer Wärmebildkamera die wärmetechnischen Messungen während der Abkühlzeit des Paneels durchgeführt wurde [46].

			Messdaten der wärmtechnischen Messung								
				Abkühlzeit							
Horotollor	Turn	T <sub>2</sub>	tall, dauer	t <sub>Beharr.</sub>	Tmax, Vorne	Tmax, Hinten	TGipskartonwand.	<b>t</b> abkühl	Tabkühl		
Heistellei	тур	°C	min	min	°C	°C	°C	min	°C		
easyTherm	comfort soft 1000	24,23	116	64	81	67,0	32,0	20	37		
Elitec	Performance 450P	24,32	75	38	92	47,2	28,2	9	37		
D4H	500S/C	22,97	62	33	60	33,1	25,6	5	37		
Fenix	Ecosun GS 500	24,44	129	74	102	41,1					
Fenix	GR 500	24,08	313	126	83	69,2	46,5	39	37		
Könighaus	P-Serie	24,09	98	51	105	60,5	41,2	8	37		

Tabelle 17: Messergebnisse der wärmtechnischen Messungen

Am Anfang dieser Arbeit sind alle physikalischen Größen der zu Tabelle 17 in einer Legende aufgelistet.

#### 4.3.3.3 Diskussion

Wie in Kapitel 2.3 erwähnt, können die Niedertemperatur-Infrarotheizungen eine Oberflächentemperatur bis 200°C erreichen. Die Messergebnisse der Wärmestrahlungsmessung in Tabelle 17 zeigen, dass die höchste Oberflächentemperatur ( $T_{max}$ , Vorme = 105°C) bei dem Infrarotpaneel des Typs "Könighaus- P-Serie" und die niedrigste Oberflächentemperatur ( $T_{max}$ , Vorme = 60°C) bei dem Infrarotpaneel des Typs "D4H 500 S/C" erreicht wurde. Andrerseits wurde an der Rückseite des Paneels die höchste Oberflächentemperatur ( $T_{max}$ , Hinten = 69,2°C) bei dem Infrarotpaneel des Typs "Fenix GR 500" und die niedrigste Temperatur ( $T_{Gipskartonwand} = 25,6°C$ ) bei dem Infrarotpaneel des Typs "D4H 500S/C" erreicht. Gipskartonwand hat die höchste Temperatur ( $T_{Gipskartonwand} = 46,5°C$ ) bei der Erwärmung mit dem Infrarotpaneel des Typs "Fenix GR 500" und die niedrigste Temperatur ( $T_{Gipskartonwand} = 25,6°C$ ) bei den Infrarotpaneel des Typs "D4H 500S/C" erreicht. Gipskartonwand hat die höchste Temperatur ( $T_{Gipskartonwand} = 46,5°C$ ) bei der Erwärmung mit dem Infrarotpaneel des Typs "Fenix GR 500" und die niedrigste Temperatur ( $T_{Gipskartonwand} = 25,6°C$ ) bei der Erwärmung mit dem Infrarotpaneel des Typs "Könighaus- P-Serie" am schnellsten ( $t_{abkühl} = 8$  min.) eine Temperatur von 37°C erreicht, während die längste Abkühlperiode ( $t_{abkühl} = 39$  min.) bei dem Paneel "Fenix GR 500" protokolliert wurde. Würden die untersuchten Infrarotpaneele an der Decke montiert werden, hätte man an der Rückseite des Paneels aufgrund der nicht mehr betrachteten Konvektion eine höhere Temperatur

gemessen [46]. Der Strahlungsanteil eines Infrarotpaneels hängt von der Oberflächentemperatur, Oberflächenbeschaffenheit und der Bauform des Paneels ab. Bei der Norm Nr. 3 in Tabelle 8 werden die Grenzwerte der maximalen Temperaturerhöhungen je nach Oberflächentemperatur und Oberflächenbeschaffenheit dargestellt.

#### 4.3.4 Strahlungsleistung und Strahlungswirkungsgrad

#### 4.3.4.1 Versuchsaufbau

Die Wärmestrahlungen an der Vorderseite des Infrarotpaneels lassen sich direkt mit der Wärmebildkamera berechnen. Dadurch war kein gesonderter Messaufbau zur Bestimmung der Strahlungsleistung und des Strahlungswirkungsgrades notwendig. Die Wärmestrahlungen an der Rückseite des Infrarotpaneels lassen sich durch die drei montierten Temperatursensoren an der Paneels berechnen. Die Definition Rückseite des der Strahlungsleistung und des Strahlungswirkungsgrads sowie die Formel, wie sie sich berechnen lassen, sind in Kapitel 2.3 dargestellt.

#### 4.3.4.2 Messergebnisse

In Tabelle 18 sind die Messdaten der gemessenen Emissionsgrade und Raumtemperaturen sowie die mit der Wärmebildkamera berechnete Strahlungsleistung *P* und der Strahlungswirkungsgrad  $\alpha$  dargestellt. Für die Berechnung der Strahlungsleistung benötigt man den Wert der umgebenden Flächen  $A_2$  und den Emissionsgrad  $\epsilon_2$ , wobei in diesem Fall  $A_2$  ein Wert von 40 m<sup>2</sup> und von  $\epsilon_2$  einen Wert von 0,9 betragen. Die Umgebungstemperatur T<sub>2</sub> ist durch den Temperatursensor T12 gemessen worden. Die von der Wärmebildkamera aufgenommenen Plots sind in Kapitel 8.4 (Abbildung 46 bis zu Abbildung 51) zu sehen.

	Strahlungsleistung $P$ und Strahlungswirkungsgrad $\alpha$												
		gem	gemessen berechnet										
		<b>E</b> 1	T <sub>2</sub>	$P_{Beh}$	arr.	P vo	rne	P Hin	ten	P Sum.		P Konv.	
Horetollor	Tup	-	-	-	α	-	α	-	α	-	α	-	α
TIEISLEIIEI	тур	-	°C	W	%	W	%	W	%	W	%	W	%
easyTherm	comfort soft 1000	0,98	24,23	504		213,8	42,4	125,7	24,9	339,5	67,3	164,8	32,7
Elitec	Performance 450P	0,99	24,32	432		220,1	51,0	47,1	10,9	267,2	61,9	164,6	38,1
D4H	500S/C	0,98	22,97	208		114,5	55,0	18,6	8,9	133,1	63,9	75,1	36,1
Fenix	Ecosun GS 500	0,95	24,44	492		206,4	42,0	60,5	12,3	266,9	54,3	224,6	45,7
Fenix	GR 500	0,95	24,08	481		160,5	33,4	78,4	16,3	239,9	49,7	241,7	50,3
Könighaus	P-Serie	0,95	24,09	557		308,0	55,3	84,6	15,2	392,6	70,5	164,7	29,6

Tabelle 18: Messdaten der gemessene Emissionsgrade und Raumtemperatur sowie mit der Wärmebildkamera berechneten Strahlungsleistung und Strahlungswirkungsgrad

Am Anfang dieser Arbeit sind alle physikalischen Größen der Tabelle 18 aufgelistet.

#### 4.3.4.3 Diskussion

Wie schon in Kapitel 2.2 erwähnt, hängt der Emissionsgrad vom Material, vom Spektralbereich und von der Temperatur der Oberfläche des Paneels ab. Man sieht in Tabelle 18, dass der Emissionsgrad  $\epsilon_1$  bei Paneelen des Typs "comfort soft 1000", "Performance 450P" und "500 S/C" etwas höher ist als der Emissionsgrad  $\epsilon_1$  von den Paneelen des Typs "Ecosun GS 500", "GR 500" und "P- Serie". Der Grund dafür ist, dass sich die Größe und das Material der untersuchten Infrarotpaneele voneinander unterscheiden.

Laut Messdaten aus Tabelle 17 und Tabelle 18 hat die Vorderseite des Infrarotpaneels "Könighaus P-Serie" die die höchste Temperatur (105°C) und die höchste Strahlungsleistung (308 W). Gemäß diesen Messwerten kann man sagen, dass die pro Fläche abgegebene Strahlungsleistung sehr stark von der Temperatur des Paneels abhängt.

In Tabelle 18 sind die Messergebnisse des Strahlungswirkungsgrads  $\alpha$  zu sehen, wobei zu sehen ist, dass der Strahlungswirkungsgrad  $\alpha$  bei der Vorderseite der untersuchten Paneele zwischen 33,4 % (Fenix–GR500) und 55,3 % (Könighaus–P-Serie) und bei der Rückseite der untersuchten Paneele zwischen 8,9 % (D4H-500S/C) und 24,9 % (easyTherm-comfortsoft 1000) liegt.

Die Wärmestrahlung durch Konvektion im Beharrungszustand weist eine Strahlungsleistung zwischen 75,1 W (D4H-500S/C) und 241,7 W (Fenix–GR500) und einen Strahlungswirkungsgrad zwischen 29,6 % (Könighaus–P-Serie) und 50,3 % (Fenix–GR500) auf, wobei man deutlich sieht, dass das Infrarotpaneel "Fenix–GR500" während der Zeit die höchste Strahlungsleistung und den höchsten Strahlungswirkungsgrad hat.

Die Summe der Strahlungsleistung der Vorderseite des Infrarotpaneels mit der Strahlungsleistung der Rückseite des Infrarotpaneels ergibt die gesamte Strahlungsleistung des Paneels [46].

Grundsätzlich ist der Strahlungswirkungsgrad bei deckenmontierten Infrarotpaneelen höher als bei wandmontierten Infrarotpaneelen. Der Grund dafür ist, dass Vorderseite und Rückseite des wandmontierten Infrarotpaneels aufgrund der nachströmenden kalten Luft geringere Temperaturen erreicht, wohingegen die Oberfläche der Vorder- und Rückseite des Infrarotpaneels eine hohe Temperatur erreicht, da an der Vorderseite des deckenmontierten Infrarotpaneels die Konvektion sehr gering ist und an der die Rückseite des deckenmontierten Infrarotpaneels keine Konvektion betrachte wird [48].

#### 4.3.5 Geräteverzeichnis

In der Tabelle 19 wird das Verzeichnis aller Messgeräte, die für die Untersuchung der Infrarotpaneele verwendet wurden, dargestellt.

	Messgerätverzeichnis									
Nr.	Messgerät	Messgröße	Messgenauigkeit							
1	DEWETRON 2600 inkl. Messverstärker DAQP-LV und DAQP-HV	Power-Quality	± 0,04 %							
2	Fluke i5s AC Stromzange	Power-Quality	1 % + 5 mA							
3	Datenlogger NFA 1000	Elektromagentische Felder	± 5 %							
4	ESM-100 3D-Feldmessgerät	Elektromagentische Felder	± 5 %							
5	Wärmebildkamera Flir T640	Wärmestrahlung	± 2°C des Ablesewertes							
6	Temperaturfühler	Temperatur	±1 K							

Tabelle 19: Verzeichnis der Messgeräte und deren Messgenauigkeit

## 5 Wirtschaftliche Analyse von IR-Heizungen

In diesem Kapitel wird zuerst auf eine wirtschaftliche Analyse von Infrarotpaneelen im Markt eingegangen. Dabei werden nach einer Marktrecherche am europäischen Markt im Sommer 2021 Herstellerübersicht, Produktübersicht und die Investitionskosten der Infrarotpaneele dargestellt. Ebenso werden in diesem Kapitel die Investitionskosten von Infrarotpaneelen gezeigt. Dann wird auf den Energiebedarf und die Energiekosten bei Einsatz von Infrarotpaneelen eingegangen. Dabei werden fünf verschiedene Abbildungen verwendet, um zu beschreiben, welche Heizleistung eine Infrarotheizung benötigt, um die Räume ausreichend zu beheizen. Schließlich wird an einem Beispiel gezeigt, wie hoch die Energiekosten für Einfamilienhaus sein können und wie viel Leistung die Infrarotpaneele benötigen, um ein Wohnhaus ausreichend zu beheizen.

### 5.1 Infrarotpaneele am europäischen Markt

Auf dem europäischen Markt gibt es laut Marktrecherche zahlreiche Hersteller von Infrarotpaneelen. Es wurden dreizehn verschiedene Hersteller aus dem europäischen Markt ausgewählt, um eine wirtschaftliche Analyse für die Infrarotpaneele erstellen zu können. Aus den Herstellerangaben wurden frei zugängliche Preise, Typen, Materialoberfläche, Leistung, Abmessungen, minimale und maximale Oberflächentemperaturen, Garantie und Schutzart von Infrarotpaneelen in einer Excel-Datei zusammengefasst. Dabei sind 593 verschiedene Infrarotpaneele von bekannten Herstellern der Infrarotheizungen in Österreich, Deutschland, der Schweiz und Tschechien mit verschiedenen Investitionskosten ausgewertet worden. In Tabelle 20 sind die Herstellerübersicht und Produktübersicht der Infrarotpaneelen am europäischen Markt dargestellt. Dabei kann man die wichtigsten Herstellerauskünfte von Infrarotpaneelen sehen, sowie die Typen der Infrarotpaneele, die Materialoberflächen, minimale und maximale elektrische Leistungsaufnahmen sowie minimale und maximale Oberflächentemperaturen, Kaufpreis (Stand Sommer 2021) und die Garantie eins Infrarotpaneels.

	Populäre Hersteller für Infrarotheizungen in Österreich, Deutschland, Schweiz und Tschechien								
Nr.	Name der Hersteller <u>Homepage</u> (Land)	Typen der IR Heizung	Materialoberfläche an der Vorderseite der IR- Heizung	Elektrische Leistungsaufnahme	Kaufpreis (Stand Sommer 2021)	Oberfläche- Temperatur Vorderseite	Garantie (Jahr)		
	easyTherm	comfort	Spezialkeramik			95 - 120 ℃			
1	www.easy-therm.com	comfortSoft	Spezialkeramik	175 - 1350 W	Keine Angabe	85-120 C	5		
	(Österreich)	comfortPlus	Spezialkeramik						
		ICONIC Classic	pulverbeschichtet						
	Heat4All Vertriebs GmbH	SmartLine	pulverbeschichtet			90 110 °C			
2	www.heat4all.com	ICONIC Bildheizung	ESG Sicherheitsglas	100 - 1020 W	259 - 1319€	50-110 C	5		
	(Österreich)	ICONIC DEKORGLASHEIZUNG	ESG Sicherheitsglas	]					
		Spiegel	ESG Sicherheitsglas						
		WE Line	Edelstahl pulverbeschichtet						
		WE Bildheizung	Edelstahl pulverbeschichtet, bedruckt						
		Pipewave	Aluminium pulverbeschichtet	inium pulverbeschichtet					
	Redwell Manufaktur GmbH	Emailheizung	Stahl keramisch beschichtet						
3	www.redwell.com	EMAIL-/TAFELHEIZUNG	Stahl keramisch beschichtet	250 - 1600 W	345 -1753 €	max. 100 °C	10		
	(Österreich)		ESG: bedruckt und keramisch						
		Clashairwar	beschichtet						
		Glasheizung	keramisch beschichtet						
			Chromspiegel						
		Premium 30	weißen pulverbeschichteten						
		Standard 30	Quarzsandbeschichtet						
		Standard 30 Color	Quarzsandbeschichtet						
		Standard 30 Rasterdecken	Quarzsandbeschichtet						
	DESING&HEATING	Standard 30 Rund	Quarzsandbeschichtet						
1	www.dh-austria.com	Motivdruck 30	Bildmotiven bedruckt	100 - 900 W	170 - 798 €	nach 5 min. ist	5		
1	(Österreich)	Motivdruck 30 rund	Bildmotiven bedruckt	100 - 300 W	170-750€	T> 60 °C	5		
			Glas: Slim-Spiegel						
		Glas Slim	Slim-Schwarz, Weiß						
			Slim-Graphit, Weinrot, Platinium						
		Glas mit Pahmon	Glas: mit Rahmen						
		Glas IIII Kalilleli	Spiegel mit Rahmen						

Tabelle 20: Herstellerübersicht und Produktübersicht Infrarotpaneele am europäischen Markt

		"Performance"	gravelly snow (mineralbeschichtung)				
		"Performance"	pulverbeschichtet				
		Standfuß Heizsäule "Exclusiv"	mineralbeschichtet				
		Sondermodelle	mineralbeschichtet				
1	elitec	Glas "GS"	Glas				-
5	www.elitec.at		Keramik: "Basalt Black"	190 - 1050 W	237,93 - 1218,75 €	Keine Angabe	5
	(Österreich)	Keramik "CR"	"Calacatta"				
			"Beton"				
1			Spiegel: Ohne Rahmen				
		Infrarot-spiegelpaneele	mit Alurahmen				
		Motivdruck "Performance"	Bildheizung				2
	h	IR-Heizung Simpel Wand IR-Heizung Simpel Decke	Aluminium, beschichtet matt weiß				
	www.heatness <sup>o</sup> (Österreich)	Infrarot Standheizung	Aluminium, beschichtet matt weiß	200,000,000	100 052 6	100.80	
6		IR-Heizung Keramik (Wand)	Keramik	300 -800 W	189 -853 €	max. 100 °C	4
1		Infrarot Bildheizung	Keramik– oder Glasplatten				
1			Glas				
		wandheizung Glas	Spiegelglas				
		Classic	Pulverbeschichtetes Aluminium				
	Digolhoot CmbH & Co. KG	Bildheizung	ESG-Sicherheitsglas				
7	unum digal haat da	Glasbildheizung	ESG - Sicherheitsglas	200 200 14/	100 1752 6	00 100 °C	E
<b>'</b>	(Doutschland)	GH	Glas- Weiß, Schwarz	500 - 800 W	109 - 1755 E	90 - 100 C	5
	(Deutschland)	SH	ESG Sicherheitsglas				
		тн	Tafelheizung				
		Bild IR- Heizung	Bild				
		Zipris Colour	farbige Infrarotheizung			90 °C	
	Vasner	Zipris S / SR	Spiegelheizung			50 C	
8	www.vasner.com	Zipris GR	extraflache Glasheizung	300 -900 W	199 -1299 €		5
	(Deutschland)	Citara M	Metall, weiß Seidenmatt lackiert			85 05 °C	
		Citara G	ESG Sicherheitsglas			60-90 C	
		InfraRaster	Stahl			96 - 110 °C	

9         UNAPERAME Wowwetherma.com (Deutschland)         IAUA-FRAME LAVA-STELL AUA-STELL AUA-STELL AUA-STELL AUA-STELL AUA-STELL Stabiblech LAVA-GLAS LAVA-STONE ESS Sicherheitsgias         100 - 1600 W         402,2 - 2075,7 €         70 - 95 °C           10         IAUA-GLAS LAVA-STONE LAVA-STONE LAVABATH-GL AUA-BATH-GL			LAVA-BASIC	Weiß (RAL 9016) Nano-Anthrazit (RAL 7016) verschiedene RAL-Farben möglich			Wand 90 °C Decke 120°C	
9         ETHERMA www.etherma.com (Deutschland)         UAVA STEEL (AVA STONE LAVA GLAS         Stabiblech specializeramik         100 - 1600 W         402,2 - 2075,7 €         70 - 95 °C         5           10         UAVA GLAS         ESS Sicherheitsglas         100 - 1600 W         402,2 - 2075,7 €         70 - 95 °C         100 - 1600 W         100 - 1600 W         402,2 - 2075,7 €         70 - 95 °C         100 - 1600 W			LAVA-FRAME	Glatte Oberfläche				
9       MAXAGLAS       Glas       100 - 1600 W       402.2 - 2075,7 €       70 - 95 °C.       70 - 100 °C       70 -	1	ETHERMAN	LAVA-STEEL	Stahlblech				
9     WWW kenterma.com (Deutschland)     LAVASTONE     Specialkeramik     100 - 1000 W     402,2 - 2075,7 €     5       10     LAVASTONE     ESG Sicherheitsglas     LAVAGATH ST     Stahlbicch       LAVABATH-GL     Sicherheitsglas     LAVABATH-GL     Sicherheitsglas       10     LAVABATH-GL     Sicherheitsglas     LAVABATH-GL     Sicherheitsglas       10     Könighaus     M-Serde     keine Angabe     100 - 1200 W     94,9 - 404,9 €     72 - 125 °C     5       10     WWW kenighaus-infranzat (Deutschland)     E-Serie     keine Angabe     100 - 1200 W     94,9 - 404,9 €     72 - 125 °C     5       11     WWW fenigroup.cz (Teschechien)     E-Serie     keine Angabe     100 - 1200 W     94,9 - 404,9 €     70 - 100 °C     5       11     WWW fenigroup.cz (Teschechien)     COMFORT     Rulverbeschichtet     Rulverbeschichtet     85 - 115°C     5       11     WWW fenigroup.cz (Tschechien)     Glas Solgegie; Glas (Platte mit Palverbeschichtet     Nineralbeschichtet     100 - 950 W     110, 67 - 679 €     70 - 100 °C     5       11     WWW fenigroup.cz (Tschechien)     EXKUSVE     Palverbeschichtet     Rulverbeschichtet     100 - 950 W     110, 67 - 679 €     70 - 100 °C     5       12     WWW fenigroup.cz (Tschechien)     ExKUSVE     Mineralbe		ETHERMA	LAVA-GLAS	Glas	100 100 11	402 2 2075 7 6		-
Indext (LAVA.GLAS)         EGS Sicherheitsglas         1//// 1/// 1/// 1/// 1/// 1/// 1/// 1/	9	(Deutechland)	LAVA-STONE	Specialkeramik	100 - 1600 W	100 - 1600 W 402,2 - 2075,7€		5
$ \begin{array}{ c                                   $	1	(Deutschland)	LAVA-GLAS	ESG Sicherheitsglas			70 - 95 °C	
$ \begin{array}{ c                                   $	1		LAVABATH ST	Stahlblech				
$ \begin{array}{                                    $	1		LAVABATH-GL	Sicherheitsglas				
$ \begin{array}{                                    $			LAVABATH-GL	Glas				
Könighaus www.koenighaus.infrarot.at (Deutschland)     P.Serie M.Serie     keine Angabe keine Angabe     100 -1200 W     94,9 -404,9 €     72 - 125 °C     5       Image: Serie (Deutschland)     ESerie (Bas Serie COMFORT     ComFoRT     Pulverkeschichtet     100 -1200 W     94,9 -404,9 €     72 - 125 °C     5       Image: Serie (Deutschland)     COMFORT SERIE (COMFORT SERIE (COMFORT SERIE (S Schwarz, G Spiegel; G Schwarz, G G G S Spiegel; G Schwarz, G G S Spiegel; G Schwarz, G G S Spiegel; G	1		LAVABATH-S	Feinstein				
10       Monignatus Www.konighaus.infrarot.at (Deutschland)       M.Serie       keine Angabe       100 - 1200 W       94,9 - 404,9 €       72 - 125 °C       5         11       Control infrarot.at (Deutschland)       Control infrarot.at (Bas Serie       Collas       85 - 115°C       85 - 115°C       5         11       FENIX TRADING S.R.O.       Control infrarot.at (Gas Craphit; GS Spiege); Gas-Spiege); Gas-Spiege); Gas-Spiege]; Gas-Sp		Känishaua	P-Serie	keine Angabe				
10       www.coling(augus-intraticus) (Deutschland)       E-serie       keine Angabe       100 - 1200 W       94,9 - 4,04,9 - 6.       3         (Deutschland)       Glas Serie       Glas       Glas       85 - 115°C       85 - 115°C         (Deutschland)       COMFORT       Pulverbeschichtet       85 - 115°C       85 - 115°C         (Deutschland)       COMFORT SERIE       Mineralbeschichtet       85 - 115°C       85 - 115°C         (Deutschland)       Gias Schwar; GS rot; Gias; Glas - Spiegel; Gias (Plate mit Pulverkustschffers; Glas; Glas - Spiegel; Gias (Plate mit Pulverkustschferschichtung); Gias; Glas - Spiegel; Gias (Plate mit Pulverkustschferschichtung); Gias (Fast - Spiegel; Gias (Plate mit Calacata; Sinterkeramik-Beton; Sinterkeramik-Beton; Sinterkeramik-Concrete taupe;       100 - 950 W       110, 67 - 679 €       70 - 100 °C       5         EXKLUSIVE       Pulverbeschichtet       Pulverbeschichtet       100 - 950 W       110, 67 - 679 €       70 - 100 °C       5         EXKLUSIVE Leinen       Mineralbeschichtet       Pulverbeschichtet       20       200 - 900 W       272,62 - 692,19       80 - 125       2         12       www.ecoheat.ch (Schweiz)       ecoheat Classic       ecoheat Classic       300 - 900 W       272,62 - 692,19       80 - 125       2         13       oekoswiss Energy AG (Schweiz)       oeko Glas       Glas (Weiß Matt; weiß glanz; Schwa	10	Konignaus	M-Serie	keine Angabe	100 1200 W	04.0 404.0.6	72 - 125 °C	-
Image: Control (Ledischand)       Glas serie       Glas serie       Glas serie       Glas serie       85 - 115°C         Image: Control (Ledischand)       COMFORT SERIE       Mineralbeschichtet       ECOSUN: [U+; 600/VT; BASIC; G Weiß, Schwarz; 6 Spiegel; Glas; Glas; Glas; Slas; Glas; Slas; Glas; Slas; Glas; Slas; Glas; Slas; Glas;	10	(Doutschland)	E-Serie	keine Angabe	100 -1200 W 94,9 -404,9 €			5
Image: constant of the constan		(Deutschland)	Glas Serie	Glas			85 - 115°C	
Image: Probability of the second s			COMFORT	Pulverbeschichtet				
11       FENIX TRADING S.R.O.       ECOSUN: [U+; 600/VT; BASIC; G Weiß, Schwarz; G Spiegel; GS Weoß; GS Schwarz; GS Spiegel; GS Gas; Glas- Spiegel; GS (Platte mit Pulverkuststoffberschichtung); Sinterkeramik-Basic, Glas; Glas- Spiegel; GS (Platte mit Pulverkuststoffberschichtung); Sinterkeramik-Basic, Glas; Graphit; GS Spiegel; E       100 - 950 W       110, 67 - 679 €       70 - 100 °C       5         11       Ymww.fenikgroup.cz (Tschechien)       EXKLUSIVE       Pulverkuststoffberschichtung); Sinterkeramik-Bach; Sinterke			COMFORT SERIE	Mineralbeschichtet				
EXKLUSIVE       Pulverbeschichtet         EXKLUSIVE Leinen       Mineralbeschichtet         EXKLUSIVE M       Mineralbeschichtet         tecoheat       ecoheat Basic         ecoheat       ecoheat Classic         ecoheat Ceramica       ecoheat Ceramica         ecoheat Vetro       Glatte Glasoberfläche         ecoheat Specchio       Spiegel         13       oekoswiss Energy AG (Schweiz)       oeko Glas         Glas Eigenmotiv Bildheizung (Schweiz)       Glas Eigenmotiv Bildheizung Glas Rasterdecken       Glas         Spiegel       Spiegel       300 - 1200 W	11	FENIX TRADING S.R.O. <u>www.fenixgroup.cz</u> (Tschechien)	ECOSUN: [U+; 600/VT; BASIC; G Weiß, Schwarz; G Spiegel; GS Weoß; GS Schwar; GS rot; GS basalt; GS pantinum gray; GS Graphit; GS Spiegel; E Weiß; K+; CR; N]	Mineralbeschichtet ; Pulverkunststoffs; Glas; Glas- Spiegel; Glas (Platte mit Pulverkuststoffberschichtung); Sinterkeramik-Basalt Black; Sinterkeramik- Calacatta; Sinterkeramik-Beton; Sinterkeramik-Concrete taupe;	100 - 950 W	110, 67 - 679 €	70 - 100 °C	5
EXKLUSIVE LeinenMineralbeschichtetEXKLUSIVE MMineralbeschichtetEXKLUSIVE MMineralbeschichtetecoheatecoheat Basicecoheatecoheat Classicecoheat Classicecoheat Ceramicaecoheat Ceramicaecoheat Ceramicaecoheat VetroGlatte Glasoberflächeecoheat SpecchioSpiegel13oekoswiss Energy AG (Schweiz)oeko GlasGlas Eigenmotiv Bildheizung Glas RasterdeckenGlasSpiegelGlasSpiegelSpiegelSpiegelSpiegel			EXKLUSIVE	Pulverbeschichtet				
Image: Constraint of the synchronic sy	1		EXKLUSIVE Leinen	Mineralbeschichtet				
12ecoheat ecoheat.ch (Schweiz)ecoheat Classic ecoheat Ceramica ecoheat Vetroecoheat Ceramica ecoheat Ceramica ecoheat Ceramica ecoheat Vetroecoheat Ceramica ecoheat Ceramica ecoheat Vetro300 - 900 W272,62 - 692,1980 - 125213oekoswiss Energy AG (Schweiz)oeko GlasGlast Glasoberfläche schwarz matt; Schwarz glanz]Jane Heine Angaben1543,08 - 2069,76 €80 - 125213www.oekoswiss.ch (Schweiz)Glas Eigenmotiv Bildheizung Glas RasterdeckenGlasGlas300 - 1200 W1543,08 - 2069,76 €4			EXKLUSIVE M	Mineralbeschichtet				
12       ecoheat www.ecoheat.ch (Schweiz)       ecoheat Classic       ecoheat Ceramica       300 - 900 W       272,62 - 692,19       80 - 125       2         13       ecoheat Vetro       Glatte Glasoberfläche ecoheat Specchio       Spiegel       300 - 900 W       272,62 - 692,19       80 - 125       2         13       oekoswiss Energy AG (Schweiz)       oeko Glas       Glas [ Weiß matt; weiß glanz; Schwarz matt; Schwarz glanz]       300 - 1200 W       1543,08 - 2069,76 €       keine Angaben       2         13       www.oekoswiss.ch (Schweiz)       Glas Eigenmotiv Bildheizung Glas Rasterdecken       Glas       Glas       Glas       300 - 1200 W       1543,08 - 2069,76 €       keine Angaben       2			ecoheat Basic					
12       www.ecoheat.ch (Schweiz)       ecoheat Ceramica       ecoheat Ceramica       300 - 900 W       272,62 - 692,19       80 - 125       2         (Schweiz)       ecoheat Vetro       Glatte Glasoberfläche ecoheat Specchio       Spiegel       300 - 900 W       272,62 - 692,19       80 - 125       2         13       oekoswiss Energy AG (Schweiz)       oeko Glas       Glas [ Weiß matt; weiß glanz; Schwarz matt; Schwarz glanz]       300 - 1200 W       1543,08 - 2069,76 €       keine Angaben       2         13       www.oekoswiss.ch (Schweiz)       Glas Eigenmotiv Bildheizung Glas Rasterdecken       Glas       Glas       300 - 1200 W       1543,08 - 2069,76 €       keine Angaben       2		ecoheat	ecoheat Classic					
(Schweiz)       ecoheat Vetro       Glatte Glasoberfläche       Image: Comparison of the comparis	12	www.ecoheat.ch	ecoheat Ceramica	ecoheat Ceramica	300 - 900 W	272,62 - 692,19	80 - 125	2
ecoheat Specchio     Spiegel     Image: Chio Spiegel     Image: Chio Spiegel       13     oekoswiss Energy AG (Schweiz)     oeko Glas     Glas [Weiß matt; weiß glanz; Schwarz matt; Schwarz glanz]     1543,08 - 2069,76 €     keine Angaben     2       13     www.oekoswiss.ch (Schweiz)     Glas Eigenmotiv Bildheizung Glas Rasterdecken     Glas     Glas     keine Angaben     2		(Schweiz)	ecoheat Vetro	Glatte Glasoberfläche				
13     www.oekoswiss.ch (Schweiz)     oeko Glas     Glas [ Weiß matt; weiß glanz; Schwarz matt; Schwarz glanz]     1543,08 - 2069,76 €     keine Angaben     2       13     Glas Eigenmotiv Bildheizung (Schweiz)     Glas Eigenmotiv Bildheizung Glas Rasterdecken     Glas     Glas     keine Angaben     2			ecoheat Specchio	Spiegel				
13     WWW.0ekoswiss.cn (Schweiz)     Glas Eigenmotiv Bildheizung     Glas     300 - 1200 W     keine Angaben     2       Glas Rasterdecken     Glas       Spiegelheizungen     Spiegel		oekoswiss Energy AG	oeko Glas	Glas [ Weiß matt; weiß glanz; Schwarz matt; Schwarz glanz]	200 4200 \\	1543,08 - 2069,76 €		
(Scriweiz) Glas Rasterdecken Glas keine Angaben Spiegelheizungen Spiegel	13	www.oekoswiss.ch	Glas Eigenmotiv Bildheizung	Glas	300 - 1200 W		keine Angaben	2
Spiegelheizungen Spiegel		(Schweiz)	Glas Rasterdecken	Glas		keine Angaben		
			Spiegelheizungen	Spiegel				

Die Preise für Infrarotheizungen variieren auf dem Markt sehr stark, doch die in Tabelle 20 dargestellten Kaufpreise zeigen, dass die Anschaffungspreise für ein Infrarotpaneel je nach Modell und Leistung zwischen 94,90 € und 2076 € liegt. Die höchsten Preise auf dem Markt laut Marktrecherche haben die Infrarotpaneele mit einer Materialoberfläche aus ESG- Sicherheitsglas und Glas. Die Preise bzw. Investitionskosten eines Infrarotpaneels hängen sehr stark von Materialoberfläche und Leistungsaufnahme des Infrarotpaneels ab. Gemäß der Herstellerangaben sieht man, dass ein IR-Paneel die minimale elektrische Leistungsaufnahme bis zu 100 W erreichen kann. Das billigste Infrarotpaneel mit einer Leistungsaufnahme von 100 W kommt vom Hersteller Könighaus, dieses Paneel wird auf dem Markt für ca. 95 € angeboten. Auf dem europäischen Markt bieten die Hersteller für die Infrarotpaneele eine Garantiedauer von minimal 2 und maximal 10 Jahren an.

#### 5.1.1 Investitionskosten von Infrarotpaneelen

Die Investitionskosten der Infrarotpaneele unterscheiden sich in Abhängigkeit von Hersteller, Leistung, Größe, Material, Aufbau und Montageart. Der Preis eines Infrarotpaneels hängt sehr stark von ihrem Materialoberfläche und Leistungsaufnahme ab.

In Tabelle 21 werden Investitionskosten von Infrarotpaneelen mit unterschiedlichen Materialoberflächen dargestellt. Die Ergebnisse der Marktrecherche zeigen uns, dass es im Markt die Paneele mit Mineralbeschichtung und Pulverbeschichtung zu den günstigen Modellen zählen, während Infrarotpaneele mit Oberflächen aus Glas und ESG- Sicherheitsglas zu den teuersten gezählt werden. Die Investitionskosten der Infrarotpaneele werden als Mittelwert und Standardabweichung dargestellt. Die Investitionskosten der Infrarotpaneele variierten zwischen 111 € und 2 076 € bei einem Mittelwert von 691 € und einer Standardabweichung von 443 €. Anzumerken ist, dass die Paneelflächen für die Investitionskosten von Infrarotpaneelen nicht berücksichtigt wurden.

Investitionskosten von IR- Paneelen										
Infrarotpaneele		Investitionskosten in €								
Materialoberfläche	Anzahl	Min.	Min. Max. Mittelwert		Standardabweichung					
Mineralbeschichtung	33	111	629	331	137					
Pulverbeschichtung	109	149	1753	714	328					
Keramikbeschichtung	58	239	1698	697	355					
Quarzsandbeschichtung	30	170	695	370	136					
Metall	4	199	299	254	42					
Stahlblech	32	349	1100	681	217					
Gravelly snow	7	250	646	403	147					
ESG Sicherheitsglas	66	299	2076	907	380					
Glas	160	195	2070	878	586					
Glas-Spiegel	28	332	1482	639	278					
Bild	29	238	1299	605	274					
Tafelheizung	3	681	867	765	94					
Gesamtergebnisse	559	111	2076	691	443					

Tabelle 21: Investitionskosten von Inf	frarotpaneelen aus	s unterschiedlichen l	Materialoberflächen
--	--------------------	-----------------------	---------------------

Bei der Preisbewertung eines IR-Paneels müssen neben Materialoberfläche und Leistungsaufnahme auch die Paneelflächen berücksichtigt werden [2]. Neben dem Hersteller und den technischen Daten wurden in einer Excel-Datei noch die bezogenen Größen (die Flächen, die Volumen) und die spezifischen Leistungen von Infrarotpaneelen angegeben und berechnet. Die mittleren Werte der Paneelflächen und die mittlere Nennleistung aller Paneele, die die gleiche Materialoberfläche haben, sowie die leistungs- und fachbezogenen Kosten sind in Tabelle 22 dargestellt.

Infrar	otpaneele	Leistung -und Flächenbezogenen Kosten			
Materialoberfläche	Mittlere Fläche	Mittlere Leistung	Mittelwert	Standardabweichung	
	m²	W	€/Wm²	€/Wm²	
Mineralbeschichtung	0,52	478	1,32	0,55	
Pulverbeschichtung	0,62	641	1,80	0,83	
Keramikbeschichtung	0,75	620	1,50	0,76	
Quarzsandbeschichtung	0,63	596	0,99	0,36	
Metall	0,47	550	0,99	0,16	
Stahlblech	0,69	626	1,58	0,50	
Gravelly snow	0,60	565	1,19	0,43	
ESG Sicherheitsglas	0,61	608	2,43	1,02	
Glas	0,63	606	2,30	1,53	
Glas-Spiegel	0,61	575	1,82	0,79	
Bild	0,54	538	2,10	0,95	
Tafelheizung	0,80	933	1,03	0,13	
Gesamtergebnisse	0,62	598	1,86	1,19	

Tabelle 22: Leistungs- und flächenbezogenen Kosten aus Bezugsgrößen der Infrarotpaneele

### 5.2 Elektrischer Energiebedarf und Energiekosten von Infrarotpaneelen

Damit man ein Infrarotpaneel in Betrieb nehmen kann, benötigt man elektrische Energie. Das heißt, beim Verwenden der Infrarotheizung als Heizungssystem müssen auch die Energieverluste berechnet werden. Deshalb sollte man bei den Investitionskosten für die Infrarotpaneele nicht nur auf die Anschaffungskosten achten, sondern auch auf die Energiekosten. Wie viel Infrarotpaneele benötigt werden und mit welchen Energiekosten diese verbunden sind, um eine Wohnung bzw. ein Haus ausreichend zu beheizen, wird im folgenden Kapitel erörtert.

#### 5.2.1 Leistungsbedarf des IR- Paneels zu der Beheizung der Räume

Damit die Heizlastberechnung des Infrarotpaneels ermittelt werden kann, sollten Labormessungen in Altbau- und Neubauwohnungen sowie in Wohnungen mit guter, mittler und schlechter Isolation durchgeführt werden.

Die österreichische Firma design&heatin [49] hat durch ihre Erfahrungen auf ihrer Homepage ein Programm für die Heizlastbestimmung vorgestellt, wobei die Experten angeben, dass sich das Programm in der Praxis gut bewährt hat. Im Zuge der Masterarbeit wurden das Programm verwendet, um zu ermitteln, welche Leistung ein Infrarotpaneel benötigt, um einen Wohnungsraum ausreichend zu beheizen. Dafür sollten mehrere Faktoren berücksichtigt werden [49] [24]:

- Wandaufbau des Raums (Dämmung und Isolation des Raums, Anzahl der Außen- und Innenwände)
- die Raumgröße und Raumhöhe
- Fensterbeschaffenheit des Objekts
- Dämmung der Kellerdecke und des Dachs
- Außentemperatur

In Tabelle 25 werden alle Daten aus dem Programm der Firma design&heatin für die Bestimmung der Leistungsbedarf der Infrarotpaneel für verschiedene Raumgröße und Raumdämmungen dargestellt, wobei es bei der Tabelle deutlich wird, welche Heizleistungen für ein IR-Paneel erforderlich sind, um die Wohnung (Wohnraum, Schlafraum, Vorraum, Kinderzimmer, Bad, WC, Wintergarten) ausreichend zu beheizen. Durch die Daten aus Tabelle 25 wurden in einem Excel-Datei nachfolgende Abbildungen (Abbildung 22 bis Abbildung 26) erstellt, die den Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung der Räume ohne Außenwände, mit einer Außenwand, zwei, drei und vier Außenwänden zeigen. Gemäß den Daten aus Tabelle 25 hat ein Infrarotpaneel im Wohnraum den gleichen Leistungsbedarf wie ein Infrarotpaneel im Kinderzimmer. Es zeichnet sich weiters ab, dass Infrarotpaneele im Schlafraum und im Vorraum den gleichen Leistungsbedarf haben. Infrarotpaneele in Bad und WC auf der anderen Seite verhalten sich in Bezug auf den Leistungsbedarf gleich wie Paneele, die in einem Wintergarten betrieben werden. (siehe Tabelle 25)

In Abbildung 22 sieht man, welche Heizleistung für ein IR-Paneel erforderlich ist, um verschiedene Raumgrößen ohne Außenwände zu beheizen. Man sieht, dass ein Infrarotpaneel am wenigsten Heizleistung benötigt, um einen gut isolierten Schlafraum oder Vorraum zu beheizen. Für einen gut isolierten Schlafraum oder Vorraum mit einer Raumgröße von 25 m<sup>2</sup> und Raumhöhe von 2,5 m<sup>2</sup> ohne Außenwände werden etwa 500 W Leistung eines Infrarotpaneels benötigen. Sollte der Schlafraum oder Vorraum ohne Außenwand mit einer Raumgröße von mindestens 5 m<sup>2</sup> gut, mittelmäßig oder schlecht isoliert sein, werden dafür Infrarotpaneele mit einer Nennleistung von 100-300 W benötigt. Sollte die Raumgröße max. 25 m<sup>2</sup> sein, benötigt man dafür ein Infrarotpaneel mit einer Nennleistung zwischen 500–1 500 W.

Andererseits benötigt das Infrarotpaneel für die Beheizung eines schlecht isolierten Bades und WCs ohne Außenwände sowie eines Wintergartens die höchste Leistung. Sollte das Bad, WC oder der Wintergarten eine Größe von 9 m<sup>2</sup> und eine Höhe von 2,5 m<sup>2</sup> haben, wird eine Heizleistung des Paneels von 945 W erfordert. Für ein gut isolierte Bad oder WC mit einer Raumgröße von 9 m<sup>2</sup> benötigt man ein Infrarotpaneel mit einer Leistung von 315 W.

Für die Beheizung eines gut, mittel oder schlecht isolierten Wohnraums oder Kinderzimmers ohne Außenwände, die eine Raumgröße von mindestens 5 m<sup>2</sup> haben, benötigt man ein IR-Paneel mit einer

Nennleistung zwischen 125-375 W. Sollten die Räume eine Raumgröße von max. 25 m<sup>2</sup> haben, wird ein IR- Paneel mit einer Leistung zwischen 625–1 875 W benötigt.

In Abbildung 23 bis zu Abbildung 26 sind verschiedene lineare Funktionen dargestellt, die den Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung verschiedener Räume mit einer Außenwand, zwei, drei oder vier Außenwänden beschreiben. In Abbildung 23 ist zu sehen, dass der Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung verschiedener Räume mit einer Außenwand größer ist als für die Beheizung verschiedener Räume ohne Außenwand. Ebenso sieht man in Abbildung 24, dass der Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung verschiedener Räume mit einer Außenwänden größer ist als für die Beheizung verschiedener Räume mit einer Außenwand und Räume ohne Außenwand. Das heißt, je mehr Außenwände eine Wohnungsraum hat, desto größer der Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels.

Nach diesen Ergebnissen sieht man, dass in Bad/WC und Wintergarten im Vergleich zu anderen Räumen (Schlafraum/Vorraum und Wohnraum/Kinderzimmern) Infrarotpaneele mit mehre Heizleistung erforderlich sind. Andererseits sind in einem Schlafraum/Vorraum im Vergleich zu anderen Räumen (Bad/WC/Wintergarten und Wohnraum/Kinderzimmern) Infrarotpaneele mit weniger Heizleistung erforderlich. Die Raumdämmung bzw. die Isolation eines Raumes spielt eine entscheidende Rolle für die Auswahl des Infrarotpaneels mit ausreichend Heizleistung.



Abbildung 22: Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung der Räume ohne Außenwände



Abbildung 23: Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung der Räume mit einer Außenwand



Abbildung 24: Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung der Räume mit zwei Außenwänden



Abbildung 25: Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung der Räume mit drei Außenwänden



Abbildung 26: Leistungsbedarf eines Infrarotpaneels für die Beheizung der Räume mit vier Außenwänden

Die drei letzten linearen Funktionen im Abbildung 26 zeigen, wann das Infrarotpaneel die höchste Heizleistung für die Beheizung der Räume eines Hauses benötigt. Bei schlechter Raumisolierung wird ein Infrarotpaneel mit großer Heizleistung benötigt, um die Räume ausreichend zu beheizen. Das bedeutet, dass eine Verwendung des Infrarotpaneels bei Räumen mit schlechter Isolation und mehreren Außenwänden nicht zu empfehlen ist, da dann durch die große Leistung des Paneels die Energiekosten sehr hoch sein können. Im Gegensatz dazu sieht man, dass der Leistungsbedarf des IR- Paneels bei gut isolierten Räumen kleiner als bei mittel oder schlecht isolierten Räumen ist.

#### 5.2.2 Heizkosten mit Infrarotpaneel

Für die Bestimmung der Heizleistung eines Einfamilienhauses wird ein Grundriss wie in Abbildung 27 angenommen. Dieser Grundriss hat eine Wohnfläche von insgesamt 96 m<sup>2</sup> und jeder einzelne Raum hat eine Höhe von 2,5 m<sup>2</sup>. Für die Bestimmung der Heizleistung dieses Einfamilienhauses werden die Daten aus Tabelle 25 verwendet.



Abbildung 27: Ein Einfamilienhaus [50]

In Tabelle 23 ist der Leistungsbedarf der Infrarotheizungen für dieses Einfamilienhaus dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei einem gut isolierten Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 96 m<sup>2</sup> etwa neuen verschiedene IR-Paneele benötigen werden, wobei vor allem Infrarotpaneele mit einer Gesamtheizleistung von 2 660 Watt verwendet werden sollen, um das Einfamilienhaus ausreichend beheizen zu können. Wenn das Haus mittelmäßig Isolierung hat, benötigen die Infrarotpaneele eine Gesamtheizleistung von 6 587 Watt, um die Menschen im Haus ausreichend zu wärmen. Für die Beheizung eins schlecht isolierten Hauses haben die Infrarotpaneele Gesamtheizleistung von 7 907 Watt.

	Leistungsbedarf der IR-heizungen für ein Einfamilienhaus									
Raum							Leistungsbedarf- IR-Heizung			
	R∟	R <sub>Β</sub>	Rн	R <sub>G</sub>		AW	gut isoliert	mittel isoliert	schlecht isoliert	
	m	m	m	m²	m <sup>3</sup>	Stück	W	W	W	
Wohnen/Essen	6,0	4,0	2,5	24,00	60,00	2	660	1650	1980	
Küche	3,0	2,5	2,5	7,50	18,75	1	197	493	592	
Kinderzimmer	4,0	3,0	2,5	12,00	30,00	2	339	825	990	
Kinderzimmer	4,0	3,0	2,5	12,00	30,00	2	339	825	990	
Schlafzimmer	3,5	3,0	2,5	10,50	26,25	1	220	552	662	
HWR	3,0	2,5	2,5	7,50	18,75	1	276	690	829	
Badzimmer	3,0	2,5	2,5	7,50	18,75	1	276	690	829	
WC	2,0	1,5	2,5	3,00	7,50	0	105	262	315	
Vorraum	6,0	2,0	2,5	12,00	30,00	0	248	600	720	
Gesamtheizleistung				96,00	240,00		2660	6587	7907	

Tabelle 23: Leistungsbedarf der IR-heizungen für ein Einfamilienhaus

Den Ergebnissen nach zu urteilen kann man sagen, dass man in einem mittelmäßig isolierten Haus Infrarotpaneele mit doppelt so viel Leistung benötigt als in einem gut isolierten Haus. In einem schlecht isolierten Haus benötigt man Infrarotpaneele mit etwa dreimal mehr Leistung als in einem gut isolierten Haus. Weniger Leistung bedeutet auch weniger Strom und umgekehrt. Das heißt, in einem gut isolierten Haus verbrauchen Infrarotpaneele pro Quadratmeter deutlich weniger Strom als in einem schlecht isolierten Haus. Für die Berechnung der Energiekosten mit Infrarotpaneel wurden die Werte des Leistungsbedarfs der Infrarotheizung mit dem Strompreis (Stand 2020 [51]) multipliziert. In Tabelle 24 werden die Energiekosten der Infrarotpaneels pro Tag, pro Stunde und pro Jahr bei einem gut, mittelmäßig und schlecht isolierten Einfamilienhaus dargestellt. Ausgehend von einem Strompreis von 21 Cent pro Kilowattstunde, ergeben sich Gesamtenergiekosten in einem gut isolierten Haus von 804,38 € pro Jahr, in einem mittelmäßig isolierten Haus 1 991,91 € pro Jahr und in einem schlecht isolierten Haus 2 391,08 € pro Jahr. Laut diesen Ergebnissen sieht man, dass die Infrarotpaneele im Altbau aufgrund höheren Energiekosten nicht zu empfehlen sind.

	Energiekosten										
Baum	Strompreis		gut isc	oliert		mittel is	oliert	s	schlecht isoliert		
Raum	(Stand 2020)	1 h	8h/Tag	180Tage/ Jahr	1 h	8h/Tag	180Tage/ Jahr	1 h	8h/Tag	180Tage/ Jahr	
	€/kWh	€	€	€	€	€	€	€	€	€	
Wohnen/Essen	0,21	0,14	1,11	199,58	0,35	2,77	498,96	0,42	3,33	598,75	
Küche	0,21	0,04	0,33	59,57	0,10	0,83	149,08	0,12	0,99	179,02	
Kinderzimmer	0,21	0,07	0,57	102,51	0,17	1,39	249,48	0,21	1,66	299,38	
Kinderzimmer	0,21	0,07	0,57	102,51	0,17	1,39	249,48	0,21	1,66	299,38	
Schlafzimmer	0,21	0,05	0,37	66,53	0,12	0,93	166,92	0,14	1,11	200,19	
HWR	0,21	0,06	0,46	83,46	0,14	1,16	208,66	0,17	1,39	250,69	
Badzimmer	0,21	0,06	0,46	83,46	0,14	1,16	208,66	0,17	1,39	250,69	
WC	0,21	0,02	0,18	31,75	0,06	0,44	79,23	0,07	0,53	95,26	
Vorraum	0,21	0,05	0,42	75,00	0,13	1,01	181,44	0,15	1,21	217,73	
Gesamtenergiekosten		0,56	4,47	804,38	1,38	11,07	1991,91	1,66	13,28	2391,08	

Tabelle 24: Energiekosten mit Infrarotheizung für ein Einfamilienhaus

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Hauptziel der vorliegenden Masterarbeit war es, eine messtechnische Analyse von Infrarotpaneelen durchzuführen.

Die Infrarotheizsysteme sind elektrische Heizsysteme, die auf Wärmestrahlung basieren. Die Infrarotheizung strahlt wie die Sonne infrarote Wärmestrahlung aus. Die Infrarotstrahlung lässt sich je nach Wellenlänge als in Infrarot A (nahes Infrarot), Infrarot B (mittleres Infrarot) und Infrarot C (fernes Infrarot) unterscheiden. Die Wellenlänge der Infrarotstrahlung liegt zwischen 0,78 und 1 000 µm und ist temperaturabhängig, wobei die Oberflächentemperatur von Infrarot A mindesten 900°C, von Infrarot B zwischen 300-900°C und von Infrarot C maximal 200°C erreicht. Infrarot C verwendet man auch bei Niedertemperaturinfrarotheizungen bzw. Infrarotpaneelen. Es gibt Wand- und Deckeninfrarotpaneele, wobei Wandinfrarotpaneele eine Oberflächentemperatur bis 120°C und Deckeninfrarotpaneele eine Oberflächentemperatur bis 200°C erreichen können. Ein Infrarotpaneel sendet durch seine Oberflächentemperatur Wärmestrahlung im Raum aus. Durch die Wärmestrahlung des Infrarotpaneels werden feste Körper (Wände, Decke, Möbel, Menschen und Tieren) direkt erwärmt. Elektrische Energie (Strom) wird als Energiequelle benötigt, um das Infrarotpaneel einzuschalten. Die Regelung des Infrarotpaneels erfolgt entweder manuell (Ein-/ Ausstecken) oder über automatische Thermostaten.

Am Institut für elektrische Anlage und Netze wurden die elektrotechnische Vermessung von sechs verschiedenen Infrarotpaneelen von fünf verschiedenen Herstellern durchgeführt, wobei die elektrischen Parameter (Strom, Spannung und Leistung), die elektromagnetischen Felder sowie die Oberflächentemperatur der Infrarotpaneele (Vorderseite und Rückseite) gemessen worden sind.

Die elektrische Messung wurden mit Hilfe einer Energie- und Power-Quality-Analyse durchgeführt. Die elektrische Messung eines Infrarotpaneels dauerte so lange, bis die Oberfläche des Infrarotpaneels die maximale Temperatur erreicht hatte. Laut der Messergebnisse wurde die Beharrungstemperatur am schnellsten bei Infrarotpaneel "D4H 500S/C" erreicht. Am spätesten wurde die Beharrungstemperatur beim Infrarotpaneel "Fenix GR-500" erreicht. Anzumerken ist, dass das Infrarotpaneel "D4H 500S/C" eine interne Regelung implementiert hatte, welches im Nulldurchgang der Spannung ganz schnell einund ausschaltete. Der Leistungsfaktor  $\lambda$  hat einen Wert zwischen 0,9997 und 0,9999 erreicht. Die THD<sub>U</sub>-Messwerte wurden mit den Werten des Leistungsverstärkers im Leerlauf verglichen, und es wurde keine wesentliche Netzrückwirkung festgestellt.

Die Messung der elektromagnetischen Felder wurden mit dem EMF-Datenlogger und dem ESM-100-3D- Feldmessgerät durchgeführt. Basierend auf ICNIRP- Referenzwerte [47] wird für magnetische Felder ein Referenzwert von 200  $\mu$ T für die Allgemeinbevölkerung empfohlen. Die Messdaten aus der Messung der elektromagnetischen Felder und der magnetischen Flussdichte zeigen, dass der Referenzwert von 200  $\mu$ T nicht erreicht wurde.

Die Messungen der Oberflächentemperatur der Infrarotpaneele (Vorderseite und Rückseite) wurden mit zwölf Temperatursensoren und einer Infrarotkamera durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen, dass die Infrarotpaneele "Könighaus–P-Serie" und "Fenix–Ecosun" an ihrer Vorderseite die höchsten Oberflächentemperaturen erreichten. An der Rückseite des Infrarotpaneels "Fenix GR-500" sind laut der Messung die höchsten Oberflächentemperaturen erreicht worden. Infrarotpaneel "D4H-500S/C" erreichte an der Vorderseite und Rückseite die niedrigste Oberflächentemperatur. Es wurde die Temperatur der Gipskartonwand gemessen, wobei die Gipskartonwand die höchste Temperatur bei der Erwärmung mit dem Infrarotpaneel des Typs "Fenix GR-500" und die niedrigste Temperatur bei der Erwärmung mit dem Infrarotpaneel des Typs "D4H 500S/C" erreicht hat.

Die Wärmestrahlungen an der Vorderseite des Infrarotpaneels wurden direkt mit der Wärmebildkamera berechnet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Infrarotpaneele der "Könighaus–P-Serie" an der Vorderseite die höchste Strahlungsleistung erreichten. Der Strahlungswirkungsgrad der Vorderseite des Infrarotpaneels lagt zwischen 33,4 % und 55,3 % und der Rückseite zwischen 8,9 % und 24,9 %. Die Summe der Strahlungsleistung der Vorderseite des Infrarotpaneels mit der Strahlungsleistung der Rückseite des Infrarotpaneels ergibt die gesamte Strahlungsleistung des Paneels, sie lag zwischen 49,7 % und 70,5 %.

Im Zuge der Arbeit wurde eine wirtschaftliche Analyse der Infrarotpaneele durchgeführt. Im Sommer 2021 wurde eine Marktrecherche von Infrarotpaneelen an europäischen Markt durchgeführt, wobei es dreizehn verschiedene Hersteller von Infrarotpaneelen für die Analyse ausgewählt wurden. Aus den Herstellerangaben wurden die technischen Daten und aus dem Internet die frei zugänglichen Preisen von 593 verschiedenen Infrarotpaneelen zusammengefasst. Es wurde ebenso eine Analyse der Investitionskosten für Infrarotpaneele und den elektrischen Energiebedarf und die Energiekosten durchgeführt.

Der Anschaffungspreis von Infrarotpaneele gemäß dieser Marktrecherche unterscheidet sich nach Modell und Leistung, wobei die Preise der Infrarotpaneele zwischen 94,90 € und 2 076 € lagen. Die Infrarotpaneele mit einer Materialoberfläche aus ESG-Sicherheitsglas und einer Leistungsaufnahme von 1 600 W werden auf dem Markt beim Hersteller Etherma aus Deutschland mit dem höchsten Preis bis zu 2 076 € gehandelt. Die Infrarotpaneele von Könighaus mit einer Leistungsaufnahme von 100 Watt werden im Markt mit dem niedrigsten Preis von 94,90 € angeboten. Die Investitionskosten für die Infrarotpaneele mit Mineralbeschichtung und Pulverbeschichtung sind geringer als für Infrarotpaneele mit Oberflächen aus Glas und ESG-Sicherheitsglas. Die Investitionskosten eines Infrarotpaneels hängen stark von Materialoberfläche und Leistungsaufnahme ab. Die Hersteller bieten für Infrarotpaneele eine Garantie zwei bis zu zehn Jahren.

Laut den Daten aus Tabelle 25 weiß man, wie viel Leistung das Infrarotpaneel benötigt, um die Räume ausreichend zu beheizen. Die Abbildung 22 bis Abbildung 26 zeigten, dass Infrarotpaneele bei gut isolierten Räumen wesentlich weniger Leistung als mittelmäßig und schlecht isolierte Räumen benötigen, um einen Raum ausreichend zu beheizen. Je geringer der Leistungsbedarf von Infrarotpaneelen für ein Familienhaus ist, umso niedriger werden die Energiekosten sein. Ein schlecht isoliertes Familienhaus benötigt Infrarotpaneele zwei Mal mehr Leistung als ein gut isoliertes, wodurch die Energiekosten bei einem schlecht isolierten Familienhaus zwei Mal höher als bei einem gut isolierten ausfallen werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] B. Vergleichsmessung, "Bericht Forschungprojekt:Technische Universität Kaiserlautern-"Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich"," pp. 1–52, 2009.
- [2] E. Von Qualitätskriterien, D. A. Ebner, M. Dipl, M. Kittl, and T. Urbanz, "ENERGIEAGENTUR Steiermark- Technologiebewertung und Untersuchung von elektrischen Infrarotheizungen Inhaltsverzeichnis," 2017.
- [3] "RP-Energie-Lexikon Infrarotheizung, Strahlungsheizung, Wärmestrahlung, Heizstrahler, Heizpilz, Hellstrahler und Dunkelstrahler, Strahlu.".
- [4] C. Neubau and S. Projektplanung, "E nergieeffizientes Wohlfühl-Klima EWK," 2016.
- [5] J. Schampel, Infrarotheizung: Gebäudebeheizung per Infrarotstrahlung. BoD--Books on Demand, 2017.
- [6] R. Wagner, "Diplomarbeit 'Wirtschaftlichkeitsbe berechnung einer Photovoltaikanlage und Möglichkeiten d n er Optimierung," 2016.
- [7] I. of /Fachgruppen/bio/Lehre/exphysbiochem, "MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG- Institut für Physik-Wärmelehre (Thermodynamik)." [Online]. Available: http://www.physik.uni-halle.de/Fachgruppen/bio/Lehre/exphysbiochem/Waerme.pdf.
- [8] J. Hoffmann, "Taschenbuch der Messtechnik TUgraz on December 2, 2016," 2016.
- [9] B. V. Florez, "Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik: Institut für Elektrische Energietechnik -Abschlussarbeit 'Kopplung von Energiesektoren: Elektrische Wärmepumpe, Heizung und Nachtspeicher,'" 2016.
- [10] D. H. B. Dr. Martina Schuster, Mag. Philipp Maier, Elisabeth Bargmann BA and Text, "Austria Energie Agency- Leitfaden Technische Isolierung- Wien, Dezemper," 2017. [Online]. Available: www.klimaaktiv.at.
- [11] "Technische Universität KAISERLAUTERN- Forschungsprojekt "Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich"," 2009.
- [12] D. D. Paneia *et al.*, "PAN European Infrared Alliance (PANEIA) Industriestandard: Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaften Teil 1: Begriffe, Symbole und Einheiten, CE-Kennzeichnung Deutsche Fassung PANEIA 60675-1," 2014.
- [13] G. Sesam, "UNI-KSSSEL-VERSITÄT: physik- oberflaechenphysik- exp2- Lehre- ExpPhysi-Waermestrahlung," 2013. [Online]. Available: https://www.unikassel.de/fb10/fileadmin/datas/fb10/physik/oberflaechenphysik/exp2/Lehre/ExpPhysI/Waerme-Seite135ff.pdf,abgerufen am 07.08.2019.
- [14] D. Rüdisser, "Abschlussbericht InfraMess Begleituntersuchung für ein Infrarot-Heizsystem und ein fernwärmebasiertes Radiatorensystem, Fachabteilung Energie und Wohnbau," no. November, 2018.
- [15] "Universität Wien- Experimentelle Grundausbildung und Hochschuldidaktik Physikalische Praktika für Anfänger- Grundpraktikum I Meteorologie MP7," *Tutoren: Gremmel Bruno, Julian Pattis, David Schmoll,* 2018. [Online]. Available: https://www.univie.ac.at/anfpra/neu1/mw/mp7/MP7.pdf, abgerufen am 07.08.2019.
- [16] D. T. M. Dr. Hermann Schranzhofer, DR. Richard Heimrath, Ao.Univ. Orof.Dr. Wolfgang Streicher, "TUGraz-Institut für Wärmtechnik (IWT): III. ENERGIEEFFIZIENTE HAUSTECHNIK."

- [17] N. Ökologie, "Heizen wie die Sonne, Auszüge aus den Bücher von Prof. Dr.-Ing Claus Meier," 2006. [Online]. Available: https://infrarotheizstrahler24.de/wp-content/uploads/2015/02/Studie-z-Infrarot-Heiztechnik.pdf,abgerufen am 25.08.2019.
- [18] S. K. I. Gmbh, "Institut Paul Sommer Studie KNEBEL Infrarot-Flachheizungen GmbH & Co. KG," pp. 1–45, 2013.
- [19] Johann Kogler, "Thera-Med Infrarot- Tiefenwärme-Grafik: Buch "Infrarot Wärme für das Leben, Delfin Wellness GmbH"." [Online]. Available: https://www.delfinwellness.at/tl\_files/delfin\_wellness/content/pdf-dokumente/infrarot/folder-infrarot-berichte.pdf, abgerufen am 06.08.2019.
- [20] PETER KOSACK, "Technische Universität Kaiserslautern: Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich 2008/2009." .
- [21] "infrarot-heizstrahler.org- Heatscope Vision 2200." [Online]. Available: http://www.infrarot-heizstrahler.org/heatscope-vision-2200/, abgerufen am 12.03.2022.
- [22] "INFRAHEAT- Infrarot- Heizung: Hellstrahler." [Online]. Available: https://www.infraheat.at/shop/index.php?main\_page=index&cPath=77\_79, abgerufen am 12.03.2022.
- [23] "Müller's Elektro-Shop- Infrarotheizung- Vitramo Decken-Heizelement (Aufputz)." [Online]. Available: https://www.muellers-elektro-shop.de/p/vitramo-decken-heizelement-aufputz, abgerufen am 12.03.2022.
- [24] "Infrarot EXPERTEN- HEIZSYSTEM INFRAROTHEIZUNG- Infrarot-C-Strahlung verstehen und effizient nutzen." [Online]. Available: https://infrarotheizung-fachpartner.at/?gclid=CjwKCAiAprGRBhBgEiwANJEY7A\_q4YAWLvvBPmx7s3ngukINxdMW\_f WVBIDsantd9RiPCjd1QgJ7xRoCTjQQAvD\_BwE, abgerufen am 19.09.2021.
- [25] D.-I. U. Mayer, "FH O/O/W-Standort Oldbg. FB Architektur SS 2005- Kapitel IV: Heizflächen-Energie, Gebäudetechnik," 2005.
- [26] R. Sprenger, "DELTA-Q- Heizflächenarten (Recknagel Sprenger), Informationsbroschüre," 2007.
- [27] "Pruefprotokoll-TU-Kaiserslautern: Ermittlung, des Nettostrahlungsleistung, des Strahlungswirkungsgrades und der Aufheiz-/ Abkühlzeit eines Niedertemperatur-Infrarotstrahlers.pdf.".
- [28] HeatWell.de, "Funktionsprinzip-einer-Infrarotheizung." [Online]. Available: https://www.heatwell.de/de/Informationen/Funktionsprinzip-einer-Infrarotheizung.134.html, abgerufen am 05.03.2022.
- [29] P. Kosack, "Technische Universität Keiserlautern- Thermodynamische Grundlagen zur Strahlungswirkungsgrad-Messung," 2014.
- [30] B. Wärme, "Densys pv5- Behagliche Wärme aus Naturstrom." [Online]. Available: https://www.densyspv5.de/wp-content/uploads/Densys-Infrarot-2016-04-26-1755.pdf, abgerufen am 25.08.2019.
- [31] "Wie ist eine Infrarotheizung aufgebaut?" [Online]. Available: https://pegaswitch.com/usefulltips/wie-ist-eine-infrarotheizung-aufgebaut/, abgerufen am 25.08.2019.
- [32] "naturwaerme ENERGIE- KONZEPTE Infrarotheizung, alles was Sie wissen müssen." [Online]. Available: https://naturwaerme.org/infrarotheizung/ , abgerufen am 25.08.2019.
- [33] I. Wärmepumpen-heizung, S. Klauz, H. L. Technik, and U. Menti, "Hochschule Luzern- Bericht: Vergleich Energieeffizienz: Infrarot-Heizung vs. Wärmepumpen-Heizung," *System*, no. September, pp. 1–8, 2010.
- [34] "Patent zum Heizanstrich Patent Nr. DE202014009744 U1 (2015): Heizanstrich, Heizfarbe, Heizlack, Heizputz, Heizvorrichtung DE 202014009744 U1, https://www.google.com/patents/DE202014009744U1?cl=de, abgerufen am 19.09.2021.".
- [35] "energie-experten.org- Ratgeber: Elektrische Heizanstriche und Heizfarben als Infrarot-

Wandheizungen." [Online]. Available: https://www.energieexperten.org/heizung/elektroheizung/begleitheizung/heizanstrich, abgerufen am 18.09.21.

- [36] "ELGA Elektro Gebäudetechnik GmbH- KWT Klausriegler wärmezechnik Heizanstrich." [Online]. Available: https://www.kwt-heizanstrich.at/info/kosten-des-heizanstrichs.html, abgerufen am 20.09.21.
- [37] C. H. Dr. Ernst Schmautzer, Dr. Andreas Abart, Emmer Wolfgang, Michael Lagler, Dr. Katrin Friedl, Paul Neundlinger, Aleksandra Draculic, Patrik Pögl, "Lehrveranstaltung des Instituts für Elektrische - Elektromagnetische Verträglichkeit elektrischer Systeme - Einführung," 2018.
- [38] U.-P. N. Leitgeb, "Technische Universität Graz- Elektrische und magnetische Felder im Alltag Leben."
- [39] "ABB Schaltanlagen- Handbuch 12. Auflage 2011," 2011.
- [40] E. Schmautzer *et al.*, "Elektromagnetische Verträglichkeit elektrischer Systeme des Instituts für Elektrische Anlagen Biologische , gesundheitliche Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder," 2018.
- [41] Ernst Schmautzer *et al.*, "EMV VO-Institut für Elektrische Anlagen Technische Universität Graz-Personenschutz: ÖNORM / ICNIRP (International Comission on Non Ionizing Radiation Protection)," 2018.
- [42] C. German *et al.*, "PAN European Infrared Alliance (PANEIA) Industriestandard: Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaften Teil 3: Prüfverfahren für Elektro-Hybridheizgeräte und Elektro-Niedertemperatur-Infrarotheizunge Deutsche Fassung PA," pp. 1–19, 2014.
- [43] D. D. Paneia *et al.*, "PAN European Infrared Alliance (PANEIA) Industriestandard: Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte Pr
  üfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaften Teil 4: Pr
  üfverfahren f
  ür Elektro-Hochtemperatur-Infrarotheizung Deutsche Fassung PANEIA 60675-4," 2014.
- [44] ÖVE/ÖNORM- EN 62233, "Verfahren zur Messung der elektromagnetischen Felder von Haushaltgeräten und ähnlichen Elektrogeräten im Hinblick auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern."
- [45] ÖVE/NÖRM- 61000-3-2, "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 3-2: Grenzwerte Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter)."
- [46] Dipl.-Ing. Mike Alexander Lagler; Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniel Brandl, "Messtechnische Untersuchung und Simulationstechnische Untersuchung ausgewählter IR-Paneele- TU Graz"Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN)" & 'Institut für Wärmetechnik (IWT).".
- [47] O. V. E. En, E. Verträglichkeit, and A. Haushaltgeräte, "ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz– 100 kHz)," 2010.
- [48] J. Heider, N. Conrad, T. Stark, A. Abdulganiev, P. Kosack, and A.-K. Wagner, "Forschungsprojekt 'IR-Bau' Potenzial von Infrarot-Heizsystemen für hocheffiziente Wohngebäude," p. 254, 2020.
- [49] Dh-austria, "desing&heating-austria- Energiebedarfsrechner für Räume mit Infrarotheizungen." [Online]. Available: https://www.dh-austria.com/energiebedarfsrechner/ , abgerufen am 03.09.2021.
- [50] "Grundriss Haus." [Online]. Available: https://www.pinterest.at/jui999888777/grundriss-haus/, abgerufen am 20.09.2021.
- [51] "oesterreichs energie- Strompreisanalyse 2020." [Online]. Available: https://oesterreichsenergie.at/downloads/publikationsdatenbank/detailseite/strompreisanalyse-2020, abgerufen am 20.09.2021.
- [52] "Aufbau einer Infrarotheizung -Index of mediafiles Bilder." [Online]. Available: https://www.allegra24.de/mediafiles/Bilder/?C=M;O=D, abgerufen am 25.08.2019.

# 8 Anhang



### 8.1 Elektrische Messergebnisse

Abbildung 28: Elektrischer Wirkleistungsbedarf (links) sowie Strom- und Spannungsverlauf (rechts) - "easyTherm comfort soft 1000-U-line elegance [46]



Abbildung 29: Elektrischer Wirkleistungsbedarf (links) sowie Strom- und Spannungsverlauf (rechts) -"Elitec–Performance 450P" [46]



Abbildung 30: Elektrischer Wirkleistungsbedarf (links) sowie Strom- und Spannungsverlauf (rechts) - "D4H 500S/C" [46]



Abbildung 31: Elektrischer Wirkleistungsbedarf (links) sowie Strom- und Spannungsverlauf (rechts) -"Fenix–Ecosun GS500" [46]



Abbildung 32: Elektrischer Wirkleistungsbedarf (links) sowie Strom- und Spannungsverlauf (rechts) -"Fenix–GR500" [46]



Abbildung 33: Elektrischer Wirkleistungsbedarf (links) sowie Strom- und Spannungsverlauf (rechts) - "Könighaus–P-Serie" [46]

### 8.2 Messergebnisse der magnetischer Felder



Abbildung 34: Messung mittels NFA-Datenlogger - "easyTherm comfort soft 1000 -U-line elegance"







Abbildung 36 Messung mittels NFA-Datenlogger-"D4H 500S/C" [46]



Abbildung 37: Messung mittels NFA-Datenlogger-"Fenix–Ecosun GS500" [46]


Abbildung 38: Messung mittels NFA-Datenlogger-"Fenix – GR500" [46]



Abbildung 39: Messung mittels NFA- Datenlogger-"Könighaus-P-Serie" [46]



## 8.3 Wärmtechnische Messergebnisse

Abbildung 40: Wärmetechnische Messung für das Produkt "easyTherm comfort soft 1000 -U-line elegance" [46]



Abbildung 41: Wärmetechnische Messung für das Produkt "Elitec-Performance 450P" [46]



Abbildung 42: Wärmetechnische Messung für das Produkt "D4H 500S/C" [46]



Abbildung 43: Wärmetechnische Messung für das Produkt "Fenix–Ecosun GS500" [46]



Abbildung 44: Wärmetechnische Messung für das Produkt "Fenix-GR500" [46]



Abbildung 45: Wärmetechnische Messung für das Produkt "Könighaus–P-Serie" [46]

## 8.4 Strahlungswirkungsgrad



Abbildung 46: Thermografie des Produkts "easyTherm comfort soft 1000 -U-line elegance" [46]



Abbildung 47: Thermografie des Produkts "Elitec-Performance 450P" [46]



Abbildung 48: Thermografie des Produkts "D4H 500S/C" [46]



Abbildung 49: Thermografie - das Produkt "Feni – Ecosun GS500" [46]



Abbildung 50: Thermografie - das Produkt "Fenix–GR500" [46]



Abbildung 51: Thermografie - das Produkt "Könighaus-P-Serie" [46]

## 8.5 Elektrischer Energiebedarf einer IR- Heizung

Tabelle 25: Leistungsbedarf der IR- Paneele für verschiedene Raumgröße und Raumdämmungen

	Erforderliche Heizleistung einer IR- Heizung, um die Räume zu beheizen																			
											Leistu	ungsbed	" larf- Infi	rarothei	zung					
	R.	R <sub>B</sub>	Ro	R <sub>G</sub>		Rai	ımdämr	nung	Raumdämmung Raumdämmung Raumdämmung Raumdämmung											
			''G						1 Ausenwände			2 Auconwände			3 Ausenwände			A Ausonwändo		
									I Ausenwa			2 4	2 Ausenwande		5 A	Sala aut Minister Older		+ Saha and Astrol		
	m	m	m	<b>m</b> <sup>2</sup>	m³	Senr gut	Wittler	Schlecht	Senr gut	Wittler	Schlecht	Senr gut	Wittler	Schlecht	Senr gut	Wittler	Schlecht	Senr gut	Wittler	Schlecht
	1	1	2.5	1	2.5	25	<b>w</b> 62	75	26	65	78	27	68	w 82	28	71	86	30	75	90
	2	1	2,5	2	5,0	50	125	150	53	131	157	55	137	165	57	143	172	60	150	180
Wohnraum/Kinderzimmer	2	1,5	2,5	3	7,5	75	187	225	79	196	236	82	206	247	86	215	258	90	225	270
	2	2	2,5	4	10,0	100	250	300	105	261	315	110	275	330	115	287	345	120	300	360
	2,5	2	2,5	5	12,5	125	375	450	151	393	393 472	157	545 412	412	145	431	451 517	180	450	430 540
	3	2,5	2,5	7,5	18,8	187,5	469	562,5	197	493	592	206	517	620	216	540	648	225	564	676
	4	2	2,5	8	20,0	200	500	600	210	525	630	220	550	660	230	575	690	240	600	720
	3	3	2,5	9	22,5	225	562	675	236	590	708	247	618	742	258	646	776	270	675	810
	3,5 4	3 3	2,5	10,5	20,5	300	750	787,5 900	315	787	828 945	339	825	990	345	756 862	1035	360	789 900	1080
	4,5	3	2,5	13,5	33,8	337,5	844	1012,5	354	887	1064	371	929	1115	388	971	1166	405	1013	1216
	4	3,5	2,5	14	35,0	350	875	1050	368	918	1102	385	969	1155	402	1006	1207	420	1050	1260
	5	3	2,5	15	37,5	375	937	1125	394	984	1181	412	1031	1237	431	1078	1293	450	1125	1350
	4	4	2,5	16 175	40,0 43.8	400	1000	1200	420 459	1050	1260	440 481	1100	1320	460 503	1150 1259	1380	480 525	1200	1440
	4,5	4	2,5	18	45,0	450	1125	1350	473	1181	1417	495	1237	1485	517	1293	1552	540	1350	1620
	5,5	3,5	2,5	19,25	48,1	481,25	1203	1443,75	505	1262	1515	529	1322	1587	553	1382	1659	577	1443	1731
	5	4	2,5	20	50,0	500	1250	1500	525	1312	1575	559	1375	1650	574	1437	1724	600	1500	1800
	/	3	2,5	21	52,5	525	1312 1375	1575	551 578	1378	1653	577 605	1443 1512	1732	603 632	1509	1811 1897	630 660	1575	1890
	6	4	2,5	24	60,0	600	1500	1800	630	1575	1890	660	1650	1980	690	1725	2070	720	1800	2160
	5	5	2,5	25	62,5	625	1562	1875	656	1640	1968	687	1718	2062	718	1796	2156	750	1875	2250
/WC/ Wintergarten	1	1	2,5	1	2,5	35	87	105	36	91	110	38	96	115	40	100	120	42	105	126
	2	1	2,5	2	5,0	70	175	210	73	183	220	77	192	231	80	201	241	84	210	252
	2	1,5 2	2,5	3	7,5 10.0	105	350	315 420	110 147	367	330	115	288	346	120	301 402	362 483	126	315 420	378 504
	2,5	2	2,5	5	12,5	175	437	525	183	459	551	192	481	577	201	503	603	210	525	630
	3	2	2,5	6	15,0	210	525	630	220	551	661	231	577	693	241	603	724	252	630	756
	3	2,5	2,5	7,5	18,8	263	658	789	276	690	829	289	723	868	302	756	905	315	789	947
	4 3	2	2,5	8 9	20,0	280	700	840 945	294 330	/35	882	308	770	924	322	805 905	966	336	840	1008
	3,5	3	2,5	10,5	26,3	368	920	1104	386	966	1159	405	1012	1215	423	1058	1267	441	1104	1325
	4	3	2,5	12	30,0	420	1050	1260	441	1102	1323	462	1155	1386	483	1207	1449	504	1260	1512
	4,5	3	2,5	13,5	33,8	473	1183	1419	496	1242	1490	520	1301	1561	544	1360	1630	567	1419	1703
	4 5	3,5	2,5	14	35,0	490 525	1225	14/0	514	1286	1543	539	1347	161/	563 603	1408	1690	588 630	1470	1/64
	4	4	2,5	16	40,0	560	1400	1680	588	1470	1764	616	1540	1848	644	1610	1932	672	1680	2016
ad	5	3,5	2,5	17,5	43,8	613	1533	1839	643	1609	1931	674	1686	2023	705	1762	2113	735	1839	2207
-	4,5	4	2,5	18	45,0	630	1575	1890	661	1653	1984	693	1732	2079	724	1811	2173	756	1890	2268
	5,5 5	3,5	2,5	19,25	48,1	6/3 700	1683 1750	2020	/0/ 735	1/6/	2121	740	1851	2222	774 805	1936 2012	2324	808	2020	2424
	7	3	2,5	21	52,5	735	1837	2205	771	1926	2315	808	2021	2425	845	2113	2535	882	2205	2646
	5,5	4	2,5	22	55,0	770	1925	2310	808	2021	2425	847	2117	2541	885	2213	2656	924	2310	2772
	6	4	2,5	24	60,0	840	2100	2520	882	2205	2646	924	2310	2772	966	2415	2898	1008	2520	3024
	5	5	2,5	25	62,5	875	2187	2625	918	2296	2756	962	2406	2887	1006	2515	3018	1050	2625	3150
	1 2	1	2,5	1	2,5	20 40	50 100	120	21 42	52 105	126	22 44	55 110	66 132	23 46	57 115	69 139	24 48	120	144
	2	1,5	2,5	3	7,5	60	150	180	63	157	189	66	165	198	69	172	207	72	180	216
	2	2	2,5	4	10,0	80	200	240	84	210	252	88	220	264	92	230	276	96	240	288
	2,5	2	2,5	5	12,5	100	250	300	105	261	315	110	275	330	114	287	344	120	300	360
	3 3	2	2,5	ь 7.5	15,0	120	300	451	126	315 394	378 473	132	330 413	396 496	138	345 432	414 518	144	360	432 541
Ξ	4	2	2,5	8	20,0	160	400	480	168	420	504	176	440	528	184	460	552	192	480	576
Schlafraum/Vorrau	3	3	2,5	9	22,5	180	450	540	189	472	567	198	495	594	206	517	620	216	540	648
	3,5	3	2,5	10,5	26,3	210	526	631	220	552	662	231	578	694	241	604	725	252	631	757
	4	3	2,5	12	30,0 33.8	248	676	720	252	630 709	/56	264	660 7/13	792 892	276	690 777	828 932	288	720	864 973
	4	3,5	2,5	14	35,0	280	700	840	294	735	882	308	770	924	322	805	966	336	840	1008
	5	3	2,5	15	37,5	300	750	900	315	787	945	330	825	990	345	862	1035	360	900	1080
	4	4	2,5	16	40,0	320	800	960	336	840	1008	352	880	1056	368	920	1104	384	960	1152
	5	3,5	2,5 2 F	17,5	43,8	350	876	1051	367	919	1103	385	963	1156	402	1007	1208	420	1051	1261
	4,3 5,5	4 3,5	2,5 2,5	19,25	48,1	384	962	1154	404	1010	1212	423	1058	1269	442	1034	1327	461	1154	1385
	5	4	2,5	20	50,0	400	1000	1200	420	1050	1260	440	1100	1320	459	1149	1379	480	1200	1440
	7	3	2,5	21	52,5	420	1050	1260	441	1102	1323	462	1155	1386	482	1207	1448	504	1260	1512
	5,5 c	4	2,5	22	55,0	440	1100	1320	462	1155	1386	484	1210	1452	505	1264	1517	528	1320	1584
	5	4 5	∠,⊃ 2,5	24	62,5	500	1250	1500	525	1312	1512	550	1375	1650	575	1437	1725	600	1500	1800