
DIPLOMARBEIT

Ing.
Markus Koppensteiner

**Projektierung und ökonomische
Bewertung gängiger Wärme-
pumpenanlagen für die Behei-
zung und Warmwasserversor-
gung am Beispiel eines Muster-
hauses**

Mittweida, 2016-15-01

DIPLOMARBEIT

**Projektierung und ökonomische
Bewertung gängiger Wärme-
pumpenanlagen für die Behei-
zung und Warmwasserversor-
gung am Beispiel eines Muster-
hauses**

Autor:

Ing. Markus Koppensteiner

Studiengang:

Maschinenbau – Gebäudetechnik

Seminargruppe:

KM12sGHA

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. (FH) Mario Gehre

Einreichung:

Mittweida, 15.01.2016

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2016

Bibliografische Beschreibung

Koppensteiner, Markus:

Projektierung und ökonomische Bewertung gängiger Wärmepumpenanlagen für die Beheizung und Warmwasserversorgung am Beispiel eines Musterhauses. –2015. – v, 161, IV S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Diplomarbeit, 2016

Kurzreferat

Im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgt im ersten Schritt die Auswahl und Projektierung heute gängiger Wärmepumpensysteme, die dann in weiterer Folge miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Investitions- und jährlich anfallenden Betriebskosten ökonomisch bewertet werden. Als Basis für diese Bewertung dient ein fiktives, beliebig gewähltes Musterhaus, welches dem heutigen Baustandard für Neubauten gemäß der Energieeinsparverordnung 2009/2014 entsprechen soll.

Zu Beginn dieser Arbeit sind ein kurzer Einblick über die Situation des österreichischen Energiemarktes, die Entwicklung des Wärmepumpenmarktes in Österreich sowie eine Vorstellung der vielseitigen Vorteile, die für den Einsatz einer modernen Wärmepumpe sprechen, angedacht. Neben dem allgemeinen, theoretischen Teil der Wärmepumpentechnologie sowie dem dahintersteckenden, thermodynamischen Grundprinzip, liegt das Hauptziel dieser Arbeit darin, herauszufinden, welche Art von Wärmepumpe für die Energieversorgung im Hinblick auf das Musterhaus aus ökonomischer Sicht am besten geeignet ist und somit die geringsten Kosten für die Bauherren repräsentiert.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Projektierung und ökonomische Bewertung gängiger Wärmepumpenanlagen für die Beheizung und Warmwasserversorgung am Beispiel eines Musterhauses

entstand im Zuge meines Fernstudiums, Studienrichtung Maschinenbau, mit dem Schwerpunkt Gebäudetechnik an der Hochschule Mittweida.

Abkürzungen, Tabellen, Formeln und Abbildungen, welche in den Texten wiederzufinden sind, werden kursiv dargestellt. Die wichtigsten Fachausdrücke werden dabei am Ende dieser Arbeit im Glossar näher erläutert und in den Texten ebenfalls kursiv dargestellt. Fußnoten die in den Textabschnitten bzw. in Tabellen und Abbildungen vorkommen, enthalten ergänzende bzw. spezifische Angaben und Erläuterungen. Zudem werden die wichtigsten Normen und Richtlinien, die im Verlauf dieser Arbeit relevant sind, zum Schluss noch einmal näher erläutert.

Nun möchte ich meinen Dank all jenen widmen, die mich bei der Erstellung meiner Diplomarbeit in unterschiedlichster Art und Weise unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig für die Betreuung meiner Diplomarbeit und für die reibungslose Zusammenarbeit. Auch möchte ich mich bei seiner Teamassistentin Frau Manuela Korehnke für die organisatorische Abwicklung und die rasche Beantwortung meiner E-Mails recht herzlich bedanken. Des Weiteren möchte ich mich bei meinem Geschäftsführer Herrn Dipl. Ing. Kurt Frühbauer für die Freistellung an einigen Freitagen, die ich im Zuge zur Ausarbeitung meiner Diplomarbeit nutzen konnte, bedanken. Abschließend gebührt mein Dank und Anerkennung meiner Familie und meiner Freundin Lisa, die mir während meiner Ausbildung allzeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Uttissenbach, Jänner 2016

Inhaltsverzeichnis

Bibliografische Beschreibung.....	5
Kurzreferat.....	5
Vorwort.....	7
Inhaltsverzeichnis	9
Abbildungsverzeichnis.....	12
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	15
1 Einleitung.....	18
1.1 Motivation.....	18
1.2 Zielsetzung.....	19
1.3 Problemsituation	20
1.4 Kapitelübersicht.....	21
2 Der österreichische Energiemarkt	22
2.1 Energieverbrauch in Österreich	22
2.2 Energetischer Endverbrauch in Österreich	23
2.2.1 <i>Entwicklung des EEV in Österreich.....</i>	<i>24</i>
2.3 Gesamtenergieeinsatz der Haushalte in Österreich.....	24
3 Die Wärmepumpe – positive Aspekte	26
3.1 Zukunftssicherheit und Unabhängigkeit.....	26
3.2 Niedrigste Betriebskosten	27
3.3 Komfort und Zuverlässigkeit.....	28
3.4 Absolut umweltfreundlich	28
3.5 Mehrere thermodynamische Funktionen	30
3.6 Entwicklung des Wärmepumpenmarktes	31
4 Die Theorie der Wärmepumpe.....	33
4.1 Funktionsweise – das Prinzip der Wärmepumpe.....	33

4.1.1	<i>Aufbau einer Wärmepumpe und deren Komponenten</i>	34
4.2	Wichtige Kennzahlen und deren Zusammenhang	36
4.2.1	<i>Leistungszahl ϵ</i>	36
4.2.2	<i>(Jahres-) Arbeitszahl β</i>	36
4.3	Der Kälteprozess einer Wärmepumpe	38
4.3.1	<i>Der Carnot'sche Vergleichsprozess</i>	38
4.3.2	<i>Der Wärmepumpenprozess im log p-h-Diagramm</i>	39
4.4	Arbeitsmittel	41
4.5	Bezeichnung von Wärmepumpen	42
5	Vorstufe zur Planung der WPA	43
5.1	Aufbau einer Wärmepumpen-Heizanlage.....	43
5.2	Wärmequellen einer Wärmepumpe	43
5.2.1	<i>Wärmequelle Wasser – Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe</i>	44
5.2.2	<i>Wärmequelle Erdreich – Die Sole-Wasser-Wärmepumpe</i>	45
5.2.3	<i>Wärmequelle Luft – Die Luft-Wasser-Wärmepumpe</i>	48
5.3	Betriebsweisen	49
5.4	Bestandteile der Wärmenutzungsanlage WNA – Hydraulik	51
5.4.1	<i>Wärmeabgabesystem</i>	51
5.4.2	<i>Pufferspeicher</i>	52
5.4.3	<i>Warmwasserbereitung WWB</i>	53
5.5	Gebäudetypen	54
5.5.1	<i>Niedrigenergiehaus NEH</i>	54
5.5.2	<i>Passivhaus PH</i>	55
5.6	Heizleistung und Heizwärmebedarf.....	56
5.6.1	<i>Ermittlung der Jahres-Heizarbeit</i>	57
5.6.2	<i>Ermittlung der Heizleistung</i>	57
6	Technische Gebäudeauslegung	58
6.1	Das Musterhaus – Ermittlung der Heizleistung	58
6.1.1	<i>Räumliche Zusammensetzung des Gebäudes</i>	58
6.1.2	<i>Überschlägige Berechnung der erforderlichen Heizleistung</i>	60
6.1.3	<i>Heizlastberechnung nach ÖNORM EN12831</i>	61
6.2	Projektierung der Wasser-Wasser-Wärmepumpe.....	63
6.2.1	<i>Hydraulikschema der Wasser-Wasser-WP</i>	65
6.3	Projektierung der Sole-Wasser-Wärmepumpe	66
6.3.1	<i>Hydraulikschema der Sole-Wasser-WP</i>	68
6.3.2	<i>Auslegung des Erdkollektors</i>	68
6.3.3	<i>Auslegung der Erdsonden</i>	70

6.4	Projektierung der Luft-Wasser-Wärmepumpe.....	71
6.4.1	<i>Ermittlung des Bivalenzpunktes und des Wärmepumpenanteils.....</i>	<i>73</i>
6.4.2	<i>Hydraulikschema der Luft-Wasser-WP</i>	<i>76</i>
6.5	Zusammenfassung der wichtigsten Auslegungsdaten	77
7	Ökonomischer Systemvergleich.....	78
7.1	Verfahren zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit.....	78
7.2	Investitionskosten der einzelnen Systeme	80
7.2.1	<i>Vorgehensweise bei der Angebotseinholung.....</i>	<i>81</i>
7.2.2	<i>Auswertung der Investitionskosten</i>	<i>82</i>
7.2.3	<i>Resümee aus den ermittelten Investitionskosten.....</i>	<i>84</i>
7.3	Betriebskosten der einzelnen Systeme.....	85
7.3.1	<i>Resümee aus den ermittelten Betriebskosten.....</i>	<i>87</i>
7.4	Kostenvergleichsrechnung KVR	89
7.4.1	<i>Kostenkriterium beim Alternativenvergleich.....</i>	<i>90</i>
7.4.2	<i>Ermittlung der Gesamtkosten</i>	<i>91</i>
7.4.3	<i>Ökonomische Bewertung anhand des Alternativenvergleichs.....</i>	<i>92</i>
7.4.4	<i>Resümee aus den ermittelten Gesamtkosten</i>	<i>94</i>
7.5	Statische Amortisationsrechnung	95
7.5.1	<i>Ermittlung der Amortisationszeit.....</i>	<i>95</i>
7.5.2	<i>Amortisationsbetrachtung Wärmepumpe vs. fossile Energiesysteme</i>	<i>97</i>
8	Schlussfolgerung und Ausblick.....	100
	Anhang.....	103
	Anhang ad Kapitel 6.....	A-105
	Anhang ad Kapitel 7.....	A-109
	Glossar.....	113
	Literaturverzeichnis	117
	Wichtige Normen, Richtlinien	120
	Selbstständigkeitserklärung.....	123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>BIV</i> nach Energieträger in <i>PJ</i> (entnommen aus [1]).....	22
Abbildung 2: <i>EEV</i> der Sektoren in <i>PJ</i> (entnommen aus [1]).....	23
Abbildung 3: Gesamteinsatz aller Energieträger in Österreichs Haushalten 2013/2014.....	25
Abbildung 4: Reichweite der Primärenergieträger (entnommen aus [6]).....	26
Abbildung 5: Betriebskosten verschiedener Heizsysteme (entnommen aus [2] S.5)	27
Abbildung 6: <i>CO₂</i> -Emissionen verschiedener Heizsystem (entnommen aus [2] S. 2).....	29
Abbildung 7: Energieflussbild Wärmepumpe (entnommen aus [7]).....	30
Abbildung 8: Marktentwicklung der Wärmepumpentechnologie in Österreich (entnommen aus [20]) Quelle: EEG.....	31
Abbildung 9: Temperaturniveaus einer Wärmepumpe (entnommen aus [17] S. 9)	34
Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau einer Wärmepumpe (entnommen aus [17] S.10)	34
Abbildung 11: Leistungszahl in Abhängigkeit vom Temperaturhub (entnommen aus [23])	37
Abbildung 12: Der Carnot-Prozess im T-S-Diagramm (entnommen aus [11] S.5).....	38
Abbildung 13: Idealer Vergleichsprozess im log p-h-Diagramm (entnommen aus [11] S.6)	39
Abbildung 14: Realer Prozess im log p-h-Diagramm (entnommen aus [14] S.41).....	40
Abbildung 15: Bezeichnungsschema von WP (entnommen aus [18] S. 33)	42
Abbildung 16: Wärmepumpen-Heizanlage (entnommen aus [6]).....	43
Abbildung 17: Wärmequellen für Wärmepumpen (entnommen aus [15])	44
Abbildung 18: Jahrestemperaturverlauf im Erdreich (entnommen aus [16])	45
Abbildung 19: Monovalenter Betrieb (entnommen aus [2] S. 41)	49
Abbildung 20: Bivalent-paralleler Betrieb (entnommen aus [2] S. 42).....	50

Abbildung 21: Bivalent-alternativ Betrieb (entnommen aus [2] S. 42).....	51
Abbildung 22: Jahres- <i>HWB</i> verschiedener Gebäudestandards (entnommen aus [19] S. 137)	56
Abbildung 23: Grundrisspläne <i>EG</i> und <i>OG</i> Musterhaus in Tull an der Donau	59
Abbildung 24: Anlagenschema einer Wasser-Wasser-WP mit Warmwasserspeicher	65
Abbildung 25: Anlagenschema Sole-Wasser-WP mit Warmwasserspeicher.....	68
Abbildung 26: Grafische Bestimmung des Verlegeabstandes (entnommen aus [17] S.107)	69
Abbildung 27: Bestimmung des Bivalenzpunktes zweier WP-Typen aus <i>Tabelle 8</i>	73
Abbildung 28: Grafische Ermittlung des Wärmepumpenanteils (entnommen aus [17] S. 123)	75
Abbildung 29: Anlagenschema Luft-Wasser-WP mit Warmwasserspeicher	76
Abbildung 30: Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung (entnommen aus [26] S.30)	79
Abbildung 31: Investitionskostenvergleich der einzelnen WPS grafisch	83
Abbildung 32: Betriebskostenvergleich der einzelnen WPS grafisch.....	87
Abbildung 33: Grafische Entwicklung der Gesamtkosten.....	92
Abbildung 34: Grafische Amortisationszeit einzelner WPS	97
Abbildung 35: Grafische Amortisationszeit WP vs. fossile Energiesysteme	99
Abbildung 36: Heizlastberechnung ÖNORM EN 12831 – Gebäudezusammenstellung.....	A-105
Abbildung 37: Heizlastanteile ÖNORM EN 12831	A-106
Abbildung 38: Eingabeoberfläche von <i>JAZCalc</i> – Gebäudedaten.....	A-107
Abbildung 39: Eingabeoberfläche von <i>JAZCalc</i> – Wärmepumpen-Anlage	A-107
Abbildung 40: Resultate aus der Berechnung mittels <i>JAZCalc</i>	A-108
Abbildung 41: Betriebskosten einer Ölheizung (entnommen aus [30])	A-111
Abbildung 42: Betriebskosten einer Gas- <i>BWH</i> (entnommen aus [30]).....	A-111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Energieverbrauch der Haushalte in Österreich	25
Tabelle 2: Entzugsleistung von Erdsonden gem. VDI 4640 (entnommen aus [17] S. 98)	46
Tabelle 3: Entzugsleistung von Erdkollektoren gem. VDI 4640 (entnommen aus [17] S. 107)	47
Tabelle 4: U-Werte verschiedener energetischer Gebäudestandards.....	54
Tabelle 5: Zusammenfassung wichtiger gebäudespezifischer Daten	62
Tabelle 6: JAZ Wasser-Wasser-Wärmepumpen verschiedener Hersteller	64
Tabelle 7: Sole-Wasser-Wärmepumpen verschiedener Hersteller	67
Tabelle 8: Luft-Wasser-Wärmepumpen verschiedener Hersteller.....	72
Tabelle 9: Technische Auslegungsdaten der Energiesysteme	77
Tabelle 10: Investitionskostenvergleich der einzelnen WPS	82
Tabelle 11: Investitionskostenbewertung der einzelnen Systeme.....	84
Tabelle 12: Betriebskostenvergleich der einzelnen WPS.....	86
Tabelle 13: Betriebskostenbewertung der einzelnen Systeme.....	88
Tabelle 14: Gesamtkostenvergleich verschiedener WPS.....	91
Tabelle 15: Ökonomische Bewertung der WPS anhand des Alternativenvergleichs.....	93
Tabelle 16: Gesamtkostenbewertung der einzelnen Systeme	94
Tabelle 17: Amortisationszeit einzelner WPS.....	96
Tabelle 18: Amortisationszeit WP vs. fossile Energiesysteme	98
Tabelle 19: Zusammensetzung der IK und der BK einer Ölheizung.....	A-109
Tabelle 20: Zusammensetzung der IK und der BK einer Gas-BWH.....	A-110

Abkürzungsverzeichnis

A_K	Erdkollektorfläche
A_T	Außentemperatur
β	(Jahres-) Arbeitszahl
BK	Betriebskosten
BIV	Bruttoinlandsverbrauch
BWH	Brennwertheizung
COP	coefficient of performance
CO₂	Kohlenstoffdioxid
ε	Leistungszahl
ε_c	Carnot'sche Leistungszahl
EE	Erneuerbare Energien
EEV	Energetischer Endverbrauch
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EG	Erdgeschoss
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
FBH	Fußbodenheizung
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GJ	Gigajoule
GK	Gesamtkosten
HWB	Heizwärmebedarf
HZS	Heizungssystem
IBN	Inbetriebnahme
IK	Investitionskosten
JAZ	Jahresarbeitszahl
JEV	Jahresenergieverbrauch
KG	Kellergeschoss
KP	Kreisprozess
KVR	Kostenvergleichsrechnung
kWh	Kilowattstunde
kWh/a	Kilowattstunde pro Jahr

kWh/m²a	Kilowattstunde pro Quadratmeter und Jahr
MWh	Megawattstunde
MwSt	Mehrwertsteuer
NEH	Niedrigenergiehaus
OG	Obergeschoss
ÖSPI	österreichischer Strompreisindex
P_F	elektrische Antriebsleistung
P_H	Heizleistung (Leistung aus Umweltenergie + Antriebsleistung)
PH	Passivhaus
P_{Heiz}	Leistungsbedarf Heizung
PJ	Petajoule
P_K	Kälteleistung
P_{spez}	spezifische Entzugsleistung
P_{WW}	Leistungsbedarf Warmwasser
Q_{EHeiz}	Energieverbrauch E-Heizstab
Q_F	eingesetzte Antriebsenergie = Jahresenergieverbrauch
Q_H	Heizwärmearbeit (Nutzwärme)
RLT	Rücklauftemperatur
ST	Stromtarif
t_A	Außentemperatur
UP	Umschaltpunkt
VLT	Vorlauftemperatur
WB	Wärmebedarf
WNA	Wärmenutzungsanlage
WP	Wärmepumpe
WPA	Wärmepumpenanlage
WPS	Wärmepumpensystem
WQ	Wärmequelle
WQA	Wärmequellanlage
WRG	Wärmerückgewinnung
WW	Warmwasser
WWB	Warmwasserbereitung
WWS	Warmwasserspeicher
W/m²	Watt pro Quadratmeter
W/m²K	Watt pro Quadratmeter und Kelvin
ZÄ	Zustandsänderungen

1 Einleitung

Im einleitenden Kapitel werden die Motivation, die Aufgabenstellung und die Problemsituation dieser Diplomarbeit vorgestellt. Im Anschluss erfolgt ein kurzer Überblick über Inhalt und Aufbau der einzelnen Kapitel dieser Arbeit.

1.1 Motivation

Heizung und Warmwasserbereitung *WWB* machen einen Anteil von über 80% des Energieverbrauchs in Österreichs Haushalten aus [04]. Um diesen prozentuellen Anteil decken zu können, ist ein möglichst effizientes Energiesystem notwendig. In der heutigen Zeit ist es besonders wichtig, die angeschlagene Umwelt zu schonen und nicht nur mehr Großteils auf fossile Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle zurückzugreifen. Ebendeshalb obliegt es der Menschheit, sukzessive umzudenken, um so für eine saubere und gesunde Umwelt zu sorgen. Die Konsequenz daraus lässt schließen, dass Wärmepumpen *WP* in der heutigen Heizungstechnik vor allem aufgrund ihrer ökologischen Vorteile stets an zunehmender Bedeutung gewinnen und mittlerweile bei modernen Einfamilienhäusern *EFH* kaum mehr wegzudenken sind. Auch Ochsner verdeutlicht im nachfolgenden Zitat die Wichtigkeit der Verwendung von erneuerbaren Energien *EE* (z.B. Wärmepumpen, Wasserkraft,...): „Wir müssen heute alle Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz nutzen. Nur bei der Nutzung aller Arten von Erneuerbaren Energien werden wir die Zukunft meistern.“ [02] S. VI. Zudem bedeutet diese Art der Energieschöpfung einen Schritt in die Unabhängigkeit von anderen Ländern und deren Rohstoffpolitik. Aktuell lässt sich dies beispielsweise an der Ukraine-Krise mit ihren negativen Auswirkungen durch die Abhängigkeit von russischem Öl und Gas erkennen. Aber auch aus ökonomischer Sicht liegt die *WP* im Vergleich zu allen anderen Energiesystemen klar im Vorteil.

In dieser Arbeit werden infolgedessen die gängigsten Wärmepumpensysteme *WPS* projiziert, gegenübergestellt und anhand eines fiktiven Musterhauses hinsichtlich ihrer anfallenden Kosten bewertet. Diese Bewertung als Resultat der vorliegenden Arbeit ist von praktischer Bedeutung, die simultan einen wichtigen Beitrag bei der Wahl des „richtigen“ Heizungssystems *HZS* für Bauherren leistet, die sich in der Planungsphase eines modernen Niedrigenergiehauses *NEH* befinden. Ergo können aus diesem wissenschaftlichen Werk

wertvolle Informationen bezogen werden, die gleichermaßen von Experten als auch von Laien verstanden werden können.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Rahmen der Aufgabenstellung einerseits mit der Projektierung heute gängiger *WPS* und andererseits mit dem mikroökonomischen Vergleich dieser projektierten Analgen am Beispiel eines fiktiven Musterhauses, welches als Referenzobjekt für die Bewertungsgrundlage herangezogen wird. Dieses Gebäude soll dem gesetzlich energetischen Baustandard eines *NEH* bzw. eines Neubaus nach *EnEV* 2009/2014 (spezifischer Heizwärmebedarf $<70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) entsprechen [19] S.137.

Zu Beginn ist ein Überblick über die Situation des österreichischen Energiemarktes angedacht. Hier wird als Einstieg der Energieverbrauch in Österreich, gemessen am Bruttoinlandsverbrauch *BIV* und der energetische Endverbrauch *EEV* der jeweiligen Wirtschaftssektoren grafisch dargestellt und erläutert. Da sich der ökonomische Vergleich im Rahmen der Aufgabenstellung ausschließlich auf private Haushalte bezieht, wird auch explizit auf den Energieverbrauch dieses Wirtschaftssektors eingegangen. Anschließend werden Statistiken bzw. Bilanzen über die Entwicklung des Wärmepumpenmarktes in Österreich über den Zeitraum der letzten Jahrzehnte angeführt. Im nächsten Schritt des theoretischen Teils, werden dem Leser die technologisch-wissenschaftlichen Grundlagen der *WP* erklärt sowie weiterführende technische Informationen, welche für die Projektierung der Systeme eine entscheidende Rolle spielen, nahegebracht.

Thermische Behaglichkeit, Wohnkomfort und niedrigste Betriebskosten *BK* sind die wesentlichen Anforderungen, welche die Nutzer an das moderne *HZS* stellen. Der praktische Teil dieser Diplomarbeit beschäftigt sich zum Großteil damit, herauszufinden, welche Art von *WP* sich am besten hinsichtlich der Investitions- und jährlichen *BK* für die Beheizung und *WWB* für das in *Kapitel 6* dimensionierte Musterhaus eignet.

Nachdem die Grundrisspläne (Erdgeschoss *EG* und Obergeschoss *OG*) des zu betrachtenden Gebäudes mit dem Konstruktionsprogramm AutoCad erfasst wurden und somit die Netto-Wohnfläche des Gebäudes zugrunde liegt, wird im ersten Schritt eine überschlägige Berechnung der erforderlichen Heizleistung durchgeführt. Um diesen gebäude-spezifischen Wert möglichst akkurat bestimmen zu können, erfolgt im Anschluss eine exakte Heizlastberechnung nach ÖNORM EN 12831. Dies erfolgt mit Hilfe der CAD-Software *PlanCal Nova* 10.1. Das daraus resultierende Ergebnis dient als Basis dafür, um

in den darauf folgenden Schritten passende Systeme, anhand von technischen Datenblättern potenzieller Hersteller, auswählen zu können. Als Hilfestellung für die Projektierung der einzelnen Systeme soll zugleich das Berechnungstool *JAZCalc*, vom Internetportal Qualitätsgemeinschaft Erdwärme, unterstützend entgegenwirken [21]. Im Anschluss an den praktischen Teil erfolgt die wirtschaftliche Betrachtungsweise der zuvor projektierten *WPS*. Dafür werden zwei verschiedene Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung in Anwendung gebracht, um schlussendlich informative Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der Energiesysteme in Bezug auf das Musterhaus treffen zu können und gleichzeitig das ökonomischste System zu bestimmen.

1.3 Problemsituation

Bei der Hausplanung ist die Entscheidung für die „richtige“ Energieversorgung mittels *WP* ein zentrales sowie umfangreiches Thema. Da es sich um eine langfristige Investition handelt – Anschaffungs- und *BK* sind hier einzukalkulieren –, ist eine genaue Investigation der vorliegenden Rahmenbedingungen des vorhandenen Grundstückes vonnöten. Hier kommen Faktoren wie z.B. die Größe des Grundstückes, Wasserqualität und Bodenbeschaffenheit des Erdreichs aber auch die Kenntnis über den energetischen Gebäudestandard mit dem damit verbundenen spezifischen *HWB* zum Tragen. Überdies gilt zu beachten, dass Kundenberater verschiedener Heizungshersteller natürlich dessen Produkte empfehlen und oftmals unerfahrenen Personen ohne spezifische Fachkenntnisse ihre Heizungslösung als die Beste und Geeignetste für ihr Haus verkaufen wollen.

Es ist überflüssig zu erwähnen, dass die Planung und Berechnung präzise und akribisch erfolgen muss, denn unzureichend dimensionierte Anlagen – sei es Unter- oder Überdimensionierung – bzw. schlecht abgestimmte Anlagenkomponenten verursachen zumeist unverträglich hohe Stromkosten. Zudem sind schlechte Anlagenwirkungsgrade (Leistungszahlen) und oftmals Störungen und Ausfälle der *WP* zu erwarten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Kenntnis über das vorliegende Grundstück, eine optimale Abstimmung aller Systemkomponenten sowie ein guter hydraulischer Abgleich einen besonders hohen Stellenwert einnimmt. All diese Dinge tragen maßgeblich zur Nutzerzufriedenheit bei und stellen somit simultan eine lange Lebensdauer der Energiesysteme sicher.

1.4 Kapitelübersicht

Die Diplomarbeit besteht aus acht Kapiteln.

Nach der allgemeinen Einleitung des ersten Kapitels erfolgt in *Kapitel 2* ein kurzer Einblick über die Situation des österreichischen Energiemarktes. Besonders interessant im Zusammenhang dieser Arbeit ist die Zusammensetzung des Energieverbrauchs in Österreichs Haushalten, welche im Detail in *Kapitel 2.3* dargestellt wird.

Anschließend werden in *Kapitel 3* die wichtigsten Gründe angeführt, die den Einsatz einer *WP* in modernen und gut gedämmten Gebäuden nach heutigem Baustandard befürworten. Hier wird auch speziell auf die ökologischen Vorteile einer *WP* im Vergleich zu konventionellen Energiesystemen eingegangen.

In *Kapitel 4* werden die technisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen der *WP* erläutert. Darunter versteht man die Funktionsweise, mit dem dahinter steckenden thermodynamischen Grundprinzip, den Aufbau samt der wichtigsten Bestandteile des Kältemittelkreises, die notwendigen Kennzahlen, welche für die Berechnung und Bewertung eine wichtige Rolle spielen, sowie die Zustandsänderungen *ZÄ* des Kälteprozesses.

Danach werden in *Kapitel 5* die Hauptbestandteile einer *WP*-Heizanlage beschrieben. Dabei werden in weiterer Folge die heute am weitest verbreiteten *WQ*, die für die Entziehung der Umgebungswärme genutzt werden können sowie die möglichen Betriebsweisen dargestellt. Anschließend werden die für diese Arbeit wichtigsten Komponenten der *WNA* erklärt. Am Ende des Kapitels erfolgt eine Gegenüberstellung verschiedener Gebäudetypen, mit anschließenden Erläuterungen zur Heizleistung und zum *HWB*.

Mit *Kapitel 6* beginnt die Einleitung des praktischen Teils dieser Arbeit. Hier wird zunächst das Musterhaus dimensioniert und spezifiziert. Anhand der gewonnenen Daten (Heizleistung, Leistung für *WW*-Bedarf usw.) werden in weiterer Folge verschiedene *WPS* ausgewählt und anschließend projiziert. Dabei werden u.a. die *JAZ* sowie der Jahresenergieverbrauch *JEV* der einzelnen Systeme bestimmt.

In *Kapitel 7* erfolgt die ökonomische Bewertung der projizierten Systeme. Dabei sollen anhand der jährlich anfallenden Gesamtkosten *GK*, Aussagen über das wirtschaftlichste System im Hinblick auf das fiktive Musterhaus getroffen werden. Am Ende dieses Kapitels wird die Wirtschaftlichkeit der *WPS* auch noch anhand der statischen Amortisationsrechnung bewertet und kurz die Situation zu fossilen Energiesystemen veranschaulicht.

Im abschließenden *Kapitel 8* werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit noch einmal zusammengefasst

2 Der österreichische Energiemarkt

Zu Beginn dieser Arbeit ist es sinnvoll, einen kurzen Einblick über die Situation des österreichischen Energiemarktes darzustellen. Dabei soll der Energiemix in Österreich, gemessen am *BIV*, die Zusammensetzung des *EEV*, sowie der Gesamtenergieeinsatz der Haushalte in Österreich veranschaulicht werden. Wenn dabei vom Energiebedarf die Rede ist, wird immer auf die zuletzt verfügbaren Daten referenziert.

2.1 Energieverbrauch in Österreich

In *Abbildung 1* ist die Entwicklung des *BIV* anhand der jeweiligen Energieträger in Österreich dargestellt. Der *BIV* ist seit 1990 um etwa 39% gestiegen und lag im Jahr 2010 bei 1.458 Petajoule PJ^1 , wodurch sich eine jährliche Steigerungsrate von etwa 1,6% einstellt.

Der Grund für den Anstieg des *BIV* in den letzten Jahrzehnten sind gestiegene *EEV* (vgl. *Abbildung 2*) in den Sektoren Verkehr (+76%), produzierender Bereich (+47%), private Haushalte (+18%) – welcher vor allem für den Schwerpunkt dieser Arbeit interessant ist – sowie öffentliche und private Dienstleistungen (+66%).

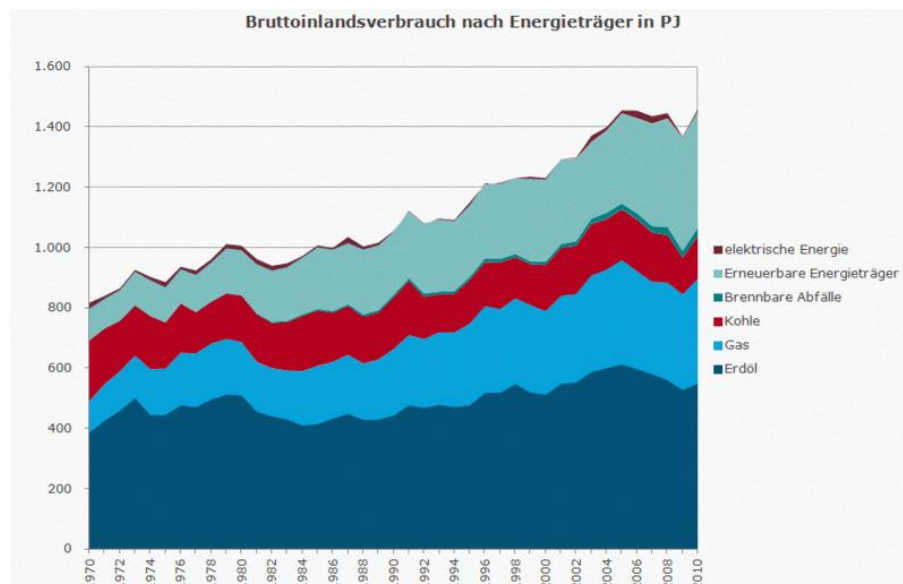


Abbildung 1: *BIV* nach Energieträger in *PJ* (entnommen aus [1])

¹ 1 *PJ* = 10^{15} Joule = $2,778^8 kWh$

² Das Diagramm wurden mit den Daten aus [4] erstellt

³ Die Tabelle wurden mit den Daten aus [4] erstellt

Die wesentliche Erkenntnis, die aus *Abbildung 1* hervorgeht, ist, dass der Großteil, nämlich etwa 71% des *BIV* mit fossilen Energieträgern gedeckt wird. Dazu zählen u.a. Erdöl, Gas und Kohle. Erdöl verzeichnet dabei einen derzeitigen dominierenden Anteil von 38%, gefolgt von Gas und Kohle mit einem Anteil von 24% respektive 10%. *EE* – worin sich auch die *WP* wiederfinden – haben einen Anteil von 26%. Mit weniger als 2%, verzeichnen die brennbaren Abfälle sowie der Import elektrischer Energie den geringsten Anteil zur Deckung des Energieverbrauchs in Österreich [1].

2.2 Energetischer Endverbrauch in Österreich

Abbildung 2 veranschaulicht, dass es drei große Wirtschaftssektoren gibt, die den *EEV* dominieren: Verkehr, produzierender Bereich und private Haushalte. Dabei verzeichnet der Sektor Verkehr mit einem Anstieg von 76% über die letzten Jahrzehnte die größte Wachstumsrate. Sein Anteil am gesamten *EEV* liegt bei 33%, wobei der Energieverbrauch dieses Sektors zu 95% aus Erdölprodukten gedeckt wird. Ebenso geht hervor, dass nahezu ein Drittel der Gesamtenergie in den privaten Haushalten verbraucht wird, wobei der größte Teil für Heizung (ca. 66,6%) und *WW* (ca. 16,08%) gebraucht wird (vgl. *Tabelle 1*).

Im Vergleich dazu, tragen die beiden Bereiche öffentliche und private Dienstleistungen sowie Landwirtschaft einen wesentlich geringeren Anteil am *EEV* bei, nämlich 11% und letzterer 2% [1].

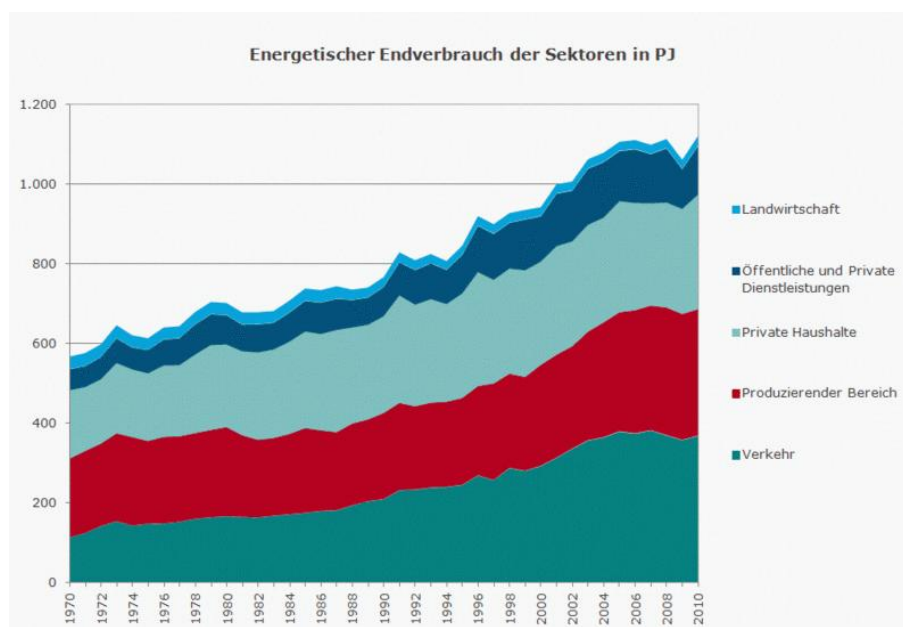


Abbildung 2: *EEV* der Sektoren in *PJ* (entnommen aus [1])

2.2.1 Entwicklung des *EEV* in Österreich

Gemäß den Berechnungen von Statistik Austria fiel der *EEV* im Jahr 2014 auf einen Wert von 1.063 *PJ* zurück. Vergleicht man diesen Wert mit jenem aus *Abbildung 2* vom Jahr 2010, so stellt sich ein prozentueller Rückgang von zirka 5% ein. Dieses Ergebnis wurde vorwiegend im Bereich der privaten Haushalte aufgrund der milden Außentemperaturen während der Heizphase erzielt. Dadurch fiel die Heizgradsumme niedriger aus als in den vergangenen Jahren, was auch anhand von *Tabelle 1* ersichtlich ist.

Bis auf die brennbaren Abfälle mit einem Zuwachs von etwa 10,3% weist der *EEV* bei allen anderen Energieträgergruppen einen deutlichen Rückgang auf, insbesondere bei den fossilen Rohstoffen wie z.B. Kohle, Erdöl und Erdgas [3].

Ziel für Österreich bis zum Jahr 2020 ist es, den Anteil an *EE* am *EEV* gemäß der Richtlinie 2009/28/EG für *EE* von derzeit 31% auf 34% anzuheben [32].

2.3 Gesamtenergieeinsatz der Haushalte in Österreich

Da sich der ökonomische Vergleich dieser Arbeit ausschließlich auf den Bereich der privaten Haushalte begrenzt, erfolgt in diesem Unterkapitel eine nähere Betrachtung über die Zusammensetzung des Energieverbrauchs und dessen Deckung in Österreichs Haushalten. Der Gesamteinsatz aller Energieträger (vgl. *Abbildung 3*) betrug in den Jahren 2013/2014 247.130.465 *GJ*.

Tabelle 1 zeigt den prozentuellen Anteil der Energieverbraucher (Heizung, *WW*, Kochen, Sonstiges) am Gesamtenergiebedarf in Österreichs Haushalten. Dabei ist zu erkennen, dass der Großteil, nämlich 66,6%, für die Beheizung des Gebäudes erforderlich ist. Kochen bzw. Haushaltsgeräte haben in den Jahren 2013/2014 mit etwa 2,83% den geringsten anteiligen Energieverbrauch. Besondere Relevanz für diese Arbeit hat der Anteil für Raumheizung und *WW* (in Summe etwa 83%), da dieser Energiebedarf im weiteren Verlauf über die *WPS* zu decken ist. Außerdem zeigt *Tabelle 1*, dass der Anteil für Raumheizung über die letzten zehn Jahre deutlich abnahm und jener für das *WW* zunahm.

Abbildung 3 zeigt den anteiligen Einsatz aller Energieträger zur Deckung des Gesamtenergiebedarfs in Österreichs Haushalten in den Jahren 2013/2014. Vorweg ist zu sagen, dass sich der Trend in den letzten Jahren von Kohle abgewandt hat und hin zu Komfortheizungen und *EE* (Wärmepumpe, Solarwärme) bewegt [4]. Die Gründe, die viele Nutzer zum Umdenken bewegen sind zum einen die ständig steigenden Energiepreise und zum anderen die Folgen und Auswirkungen des Klimawandels.

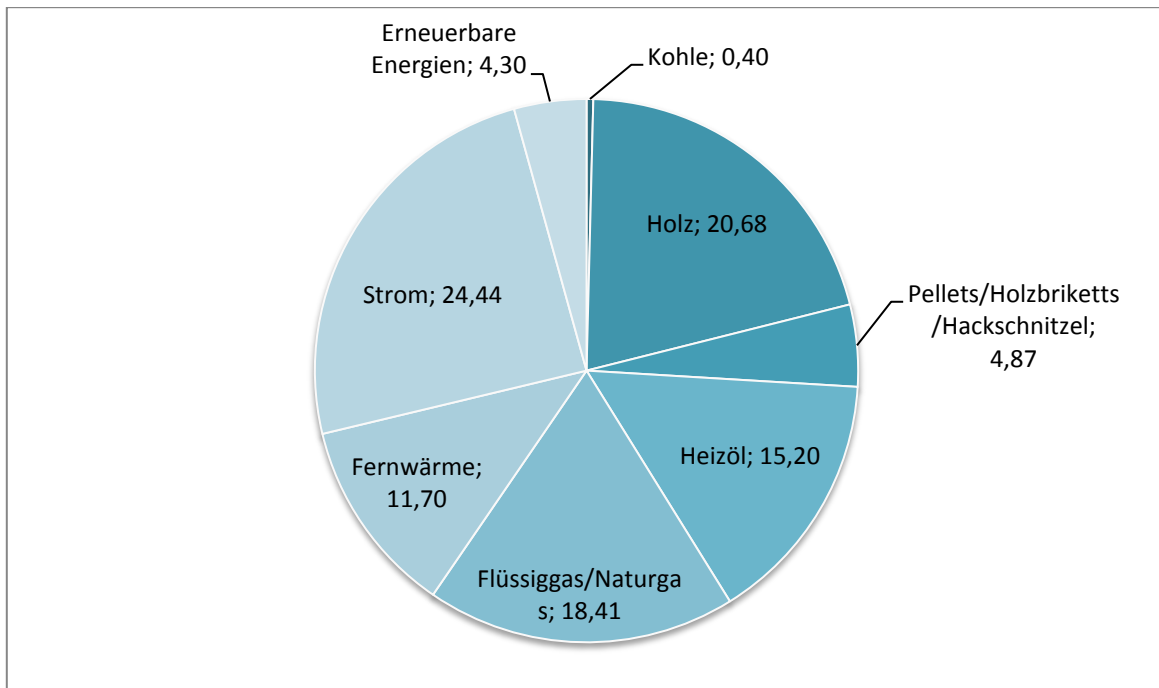


Abbildung 3: Gesamteinsatz aller Energieträger in Österreichs Haushalten 2013/2014²

Die Erkenntnis, die das Diagramm liefert, ist, dass der Gesamteinsatz von Kohle in den Jahren 2013/2014 mit 0,4% gegenüber dem Jahr 2000 um mehr als 3% gesunken ist. Somit spielte Kohle in den letzten zehn Jahren als Energieversorgung nur mehr eine untergeordnete Rolle im Haushaltsbereich. Auch Heizöl verlor in den letzten Jahren stetig Marktanteile: sein Anteil betrug in den Jahren 2003/2004 noch 24,9% und sank bis zu den Jahren 2013/2014 auf etwa 15,2%.

EE hingegen – Wärmepumpen und Solarwärme – gewinnen in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung und finden sich mit einem Gesamteinsatz von etwa 4,3% wieder [4]. Ihr Anteil wird auch zukünftig durch den Einsatz moderner *WPS* in effizienten und gut gedämmten *NEH* und Passivhäuser *PH* stetig steigen.

Jahr	Raumheizung	Warmwasser	Kochen	Sonstiges
2003/2004	70,73 %	13,22 %	2,50 %	13,55 %
2011/2012	67,10 %	15,75 %	2,74 %	14,40 %
2013/2014	66,60 %	16,08 %	2,83 %	14,49 %

Tabelle 1: Energieverbrauch der Haushalte in Österreich³

² Das Diagramm wurden mit den Daten aus [4] erstellt

³ Die Tabelle wurden mit den Daten aus [4] erstellt

3 Die Wärmepumpe – positive Aspekte

In *Kapitel 3* werden verschiedenste Aspekte angeführt, die für den Einsatz einer *WP* sprechen und gleichzeitig verdeutlichen, warum man fossile *HZS* in der nahen Zukunft meiden sollte. Die genannten Vorteile beziehen sich vorwiegend auf Gebäudetypen mit sehr guten Dämmeigenschaften bzw. Neubauten nach *EnEV 2009/2014*. Am Ende von *Kapitel 3* erfolgt ein kurzer Überblick – dargestellt anhand einer Grafik – über die Entwicklung des Wärmepumpenmarktes in Österreich in den letzten Jahrzehnten.

3.1 Zukunftssicherheit und Unabhängigkeit

„Die Wärmepumpe stellt das heute *modernste* Heizsystem dar“ und löst neben den Holz-, Kohle-, Koks- und Ölheizungen nun auch die Gaskessel in immer mehreren Fällen ab. Wie in *Abbildung 4* zu erkennen ist, werden fossile Energieträger wie z.B. Erdöl, Erdgas und Uran nur mehr über wenige Jahre verfügbar sein, da es sich um begrenzte Ressourcen handelt. Die Rohstoffknappheit auf unserem Planeten und die damit verbundenen Energiepreissteigerungen veranlassen den Konsumenten nach alternativen Lösungen zu suchen und gelangen somit vermehrt hin zur Nutzung von *EE*. Ein aktuelles Beispiel für die Abhängigkeit von russischem Gas und Öl verdeutlicht uns die Ukraine-Krise.

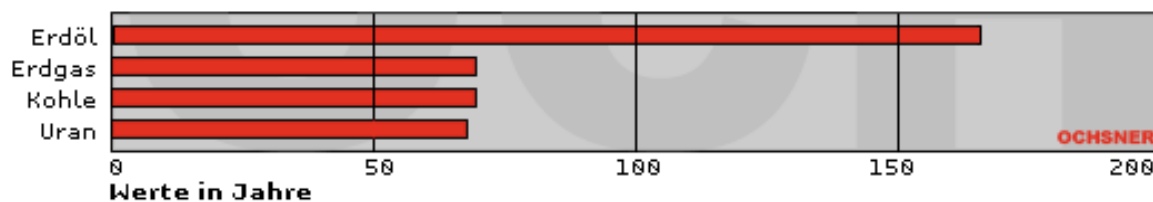


Abbildung 4: Reichweite der Primärenergieträger (entnommen aus [6])

Die *WP* hingegen bezieht ihre Energie aus der Umgebung; diese Energiequellen sind unerschöpflich und überall krisensicher verfügbar.

„Wer in die Zukunft blickt, wird zwangsläufig auf eine *WP* stoßen“, so können bei entsprechender Auslegung bereits mit der heutigen Technologie die geringsten Betriebskosten *BK* erzielt werden, sodass die Energieversorgung des Gebäudes auch langfristig noch leistbar sein wird. Der Einsatz von *WP* bedeutet einen Schritt in die Unabhängigkeit anderer Länder und deren Rohstoffpolitik [2] S. 6-7.

3.2 Niedrigste Betriebskosten

Wie bereits in *Kapitel 3.1* angedeutet kann die *WP* bei exakter Anlagenplanung und optimaler Abstimmung aller Anlagenkomponenten die niedrigsten *BK* im Vergleich zu allen anderen Energiesystemen erreichen. Dies zeigt auch die unten dargestellte Grafik, *Abbildung 5*. Steigen die Energiepreise der fossilen Brennstoffe, bspw. der von Kohle, Gas und Öl an, so werden die jährlichen *BK* der *WP* verhältnismäßig noch billiger. Die *WP* bringt den großen Vorteil mit sich, dass etwa $\frac{3}{4}$ der Heizenergie, kostenlos aus der Umwelt (gespeicherte Sonnenenergie im Erdreich, Wasser, Umgebungsluft) gewonnen wird. Dadurch ergeben sich beachtliche Kostenvorteile bei den *BK* gegenüber Holz-, Kohle-, Gas- und Ölheizungen, selbst in wirtschaftlich schwierigen Zeiten und bei Teuerungen der Strompreise.

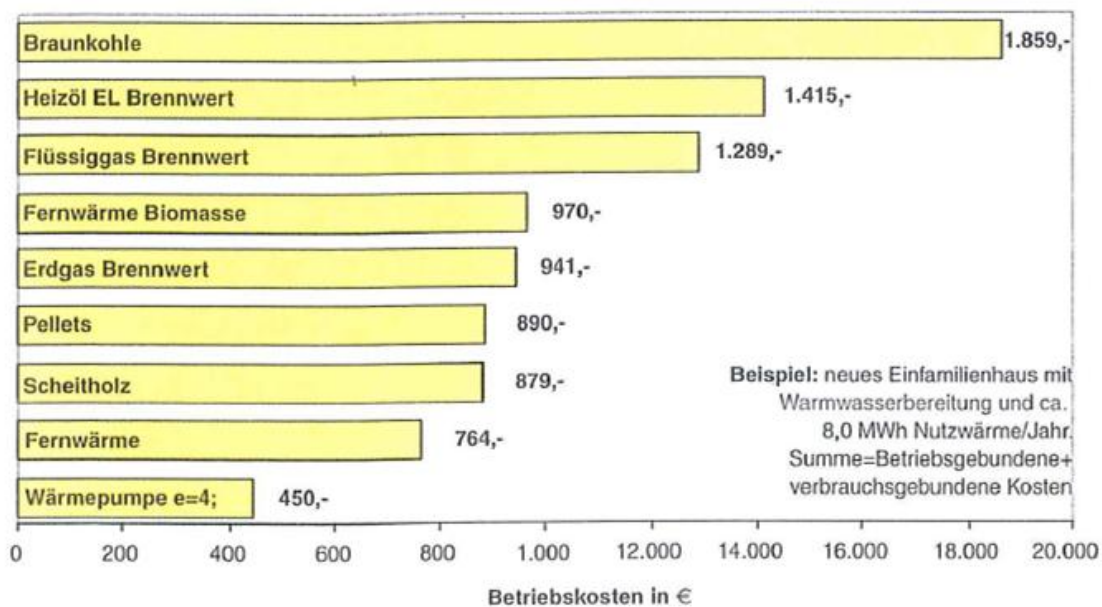


Abbildung 5: Betriebskosten verschiedener Heizsysteme (entnommen aus [2] S.5)⁴

Abbildung 5 zeigt einen typischen Vergleich der jährlichen *BK* (Summe aus Betriebs- u. Verbrauchsgebundenen Kosten) verschiedener Energieträger. Wie der Grafik zu entnehmen ist, stellen sich bei der *WP* (Leistungszahl $\epsilon=4$) die geringsten jährlichen *BK* ein. Fossile Energieträger hingegen, wie z.B. Kohle, Heizöl und Flüssiggas, stellen die höchsten Kosten für den Verbraucher dar. Aus dem obigen Beispiel ist deutlich zu sehen, dass Öl- bzw. Gasheizungen im Betrieb etwa dreimal teurer sind als *WP* [2] S. 5.

⁴ Wohnhaus 175m², Heizleistung 8 MWh Nutzwärmeverbrauch, 09/2008

3.3 Komfort und Zuverlässigkeit

Anders als bei konventionellen *HZS* erfolgt die Anhebung des Energieniveaus bei *WP* in einem geschlossenen thermodynamischen Kreisprozess *KP* – nähere Informationen hierzu in *Kapitel 4*. Dadurch findet keine gewöhnliche Verbrennung statt, was sie im Hinblick auf potentielle Unfallrisiken besonders sicher macht. *WP* arbeiten zudem vollautomatisch, geräuschlos, wartungsfrei sowie emissionsfrei am jeweiligen Standort.

„Brennstoffversorgung, Ascheentsorgung und Rauchfangkehren entfallen“, was wiederum einen geringen Wartungsaufwand, verbunden mit Kostenersparnissen bedeutet.

Platzsparend – da keine Lagerräume für Brennstoffe benötigt werden – zählt ebenso zu den positiven Nebeneffekten beim Einsatz einer *WPA*.

„Die Wärmepumpen-Heizung bietet höchstmöglichen Heiz-, Bedien- und Wohnkomfort“ – besonders bei Neubauten werden in Kombination häufig *FBH* oder Wandheizungen verwendet, da sie in der Regel mit niedrigen *VLT* auskommen. Ihr Einsatz schafft optimale Behaglichkeit und ein gesundes Wohnklima und sorgt für die damit verbundene Nutzerzufriedenheit. Ebenso finden keine Luft- und Staubverwirbelungen beim Einsatz von *FBH* statt [2] S. 7.

3.4 Absolut umweltfreundlich

WP erzeugen je nach Art der Wärmequelle (Erdreich, Wasser, Umgebungsluft) absolut emissionsfreie Heizenergie, insbesondere in Kombination mit Photovoltaikanlagen, ergo bei Erzeugung von Ökostrom (vgl. *Abbildung 7*). Im Vergleich dazu entstehen bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen (Kohle, Öl und/oder Gas) giftige Schadstoffe, wie z.B. Stickoxide, Kohlendioxide, Schwefel, Ruß und andere umweltbelastende Abgase. Diese tragen maßgebend zur Verstärkung des Treibhauseffektes und zum Klimawandel bei. Die Folgen sind u.a. häufigere Umweltkatastrophen wie z.B. Gewitter, Hagel, Sturmschäden und der gleichen aber auch der Anstieg des Meeresspiegels und die globale Klimaerwärmung von 1,5 bis 6°C in einem Jahrhundert laut IPCC⁵ und die damit verbundene Eisschmelze.

Zusätzlich entstehen beim Einsatz von Wärmepumpen-Heizungssysteme keine Geruchs- und Feinstaubbelastungen, was sich vor allem beim Heizen mit Holz, Pellets und Hackschnitzel negativ auswirken kann. Die *WP* kann daher problemlos in allen Räumen

⁵ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

des Gebäudes aufgestellt werden und nebenbei vielseitig genutzt werden (nähere Informationen siehe *Kapitel 3.5*). Im Kältekreis kommen ausschließlich chlorfreie und ozonneutrale Kältemittel zum Einsatz.

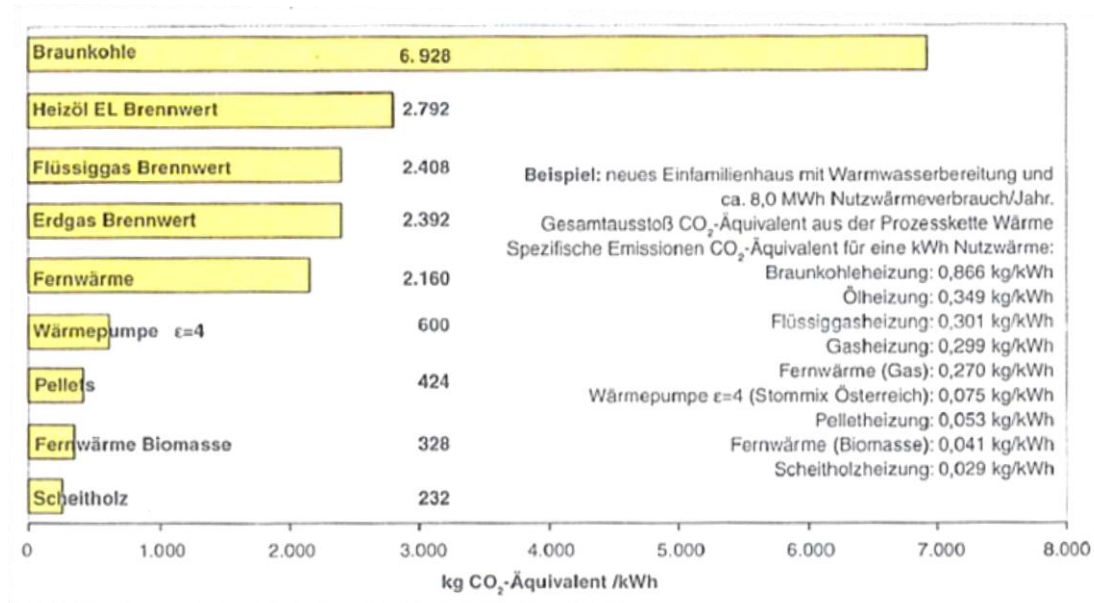


Abbildung 6: CO₂-Emissionen verschiedener Heizsystem (entnommen aus [2] S. 2)

Abbildung 6 zeigt den Emissionsvergleich verschiedener Heizsysteme in Kilogramm pro Jahr⁶. Im Vergleich zu den konventionellen Energiesystemen wie z.B. der Kohleheizungen, der Öl- und der Gas-Brennwertkesseln, hat die WP mit einem spezifischen Emissionswert von 0,075 kg/kWh deutlich geringere Belastungswerte und leistet somit einen entscheidenden Beitrag für ein sauberes und gesundes Klima. Im konkreten Anwendungsbeispiel bedeutet das einen jährlichen Gesamtausstoß von 600 kg für die WP. Die Ölheizung hingegen emittiert etwa 2800 kg CO₂ pro Jahr – also in etwa das 4,5-fache. Pellets-Öfen bzw. Hack-schnitzelheizungen sind nur „langfristig beding CO₂-Neutral, jedoch nicht ohne Emission von oben genannten Schadstoffen, insbesondere von Feinstaub“ [2] S. 2.

Abbildung 7 zeigt das Energieflussbild einer WP unter Heranziehung des europäischen Strom-Mix. Wie bereits in *Kapitel 3.2* erwähnt können $\frac{3}{4}$ der Nutzenergie aus der Umwelt kostenlos und unbegrenzt bezogen werden. $\frac{1}{4}$ elektrischer Strom wird für den Antrieb der Pumpe benötigt, um 100% Nutzwärme zu generieren.

⁶ EFH mit WWB und ca. 8,0 MWh Nutzwärmeverbrauch pro Jahr

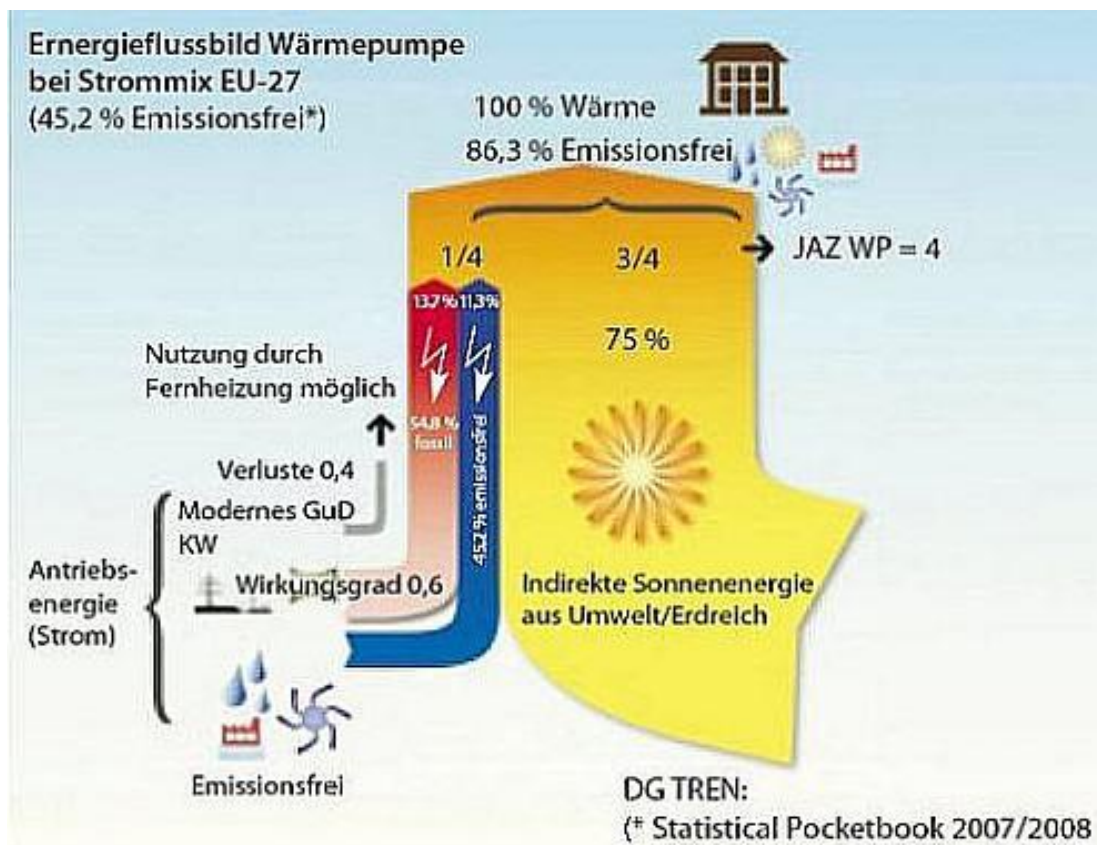


Abbildung 7: Energieflussbild Wärmepumpe (entnommen aus [7])

Bei Verwendung des europäischen Strom-Mix kann laut der obigen Grafik, 86,3% Nutzwärme emissionsfrei geltend gemacht werden. Der Strom wird dabei zu 54,8% aus fossilen Energieträgern und zu 45,2% emissionsfrei (z.B. Windkraft, Wasserkraft) bereitgestellt. Standortbezogen arbeitet die WP aber auf jeden Fall zu 100% emissionsfrei [7].

3.5 Mehrere thermodynamische Funktionen

WP können nicht nur primär für Heizungszwecke und für die WWB eingesetzt werden, sondern z.B. im Sommer auch zur Kühlung des Gebäudes dienen. Diese Gegebenheit wird in den nächsten Jahren aufgrund der nachweislichen Temperaturanstiege in den Sommertagen unseres Breitengrades eine immer größere Rolle in modernen Niedrigenergie- und Passivhäusern einnehmen.

Der Einsatz einer Warmwasser-WP bringt den Vorteil mit sich, dass gleichzeitig der Aufstellungsraum der WP gekühlt und entfeuchtet werden kann. Sie kann daher bspw. sehr gut für die Kellerentfeuchtung eingesetzt werden ohne jeglichen Zusatzaufwand an Investitions- und Betriebskosten.

In Kombination mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung kann die Wärme aus der Abluft für die Beheizung des Gebäudes bzw. im Sommer für die Klimatisierung genutzt werden [2] S. 9.

Zudem lassen sich *WP* auch sehr gut mit Solar- und/oder Photovoltaikanlagen kombinieren, welche unterstützend zur *WWB* bzw. Stromerzeugung für die Pumpe dienen. Dadurch kann Ökostrom für den Antrieb der Pumpe erzeugt werden und das Gebäude wie bereits zuvor erwähnt, zu 100% CO₂-neutral mit Energie versorgt werden.

3.6 Entwicklung des Wärmepumpenmarktes

Abbildung 8 zeigt die historische Entwicklung des österreichischen Wärmepumpenmarktes anhand der jährlich installierten Anlagen und der in Betrieb befindlichen Anlagen von 1976 bis 2014. Dabei werden die drei gängigsten Anlagentypen für die Heizung, die Brauchwasserbereitung (auch *WWB* genannt) und für die Lüftung gegenübergestellt. Die Grafik gibt Aufschluss darüber, dass sich während der 1990er Jahre die Verkaufszahlen relativ stark reduzierten. Dies lässt sich zum einen auf die damals sinkenden Ölpreise und zum anderen auf mangelhaftes Qualitätsmanagement zurückführen.

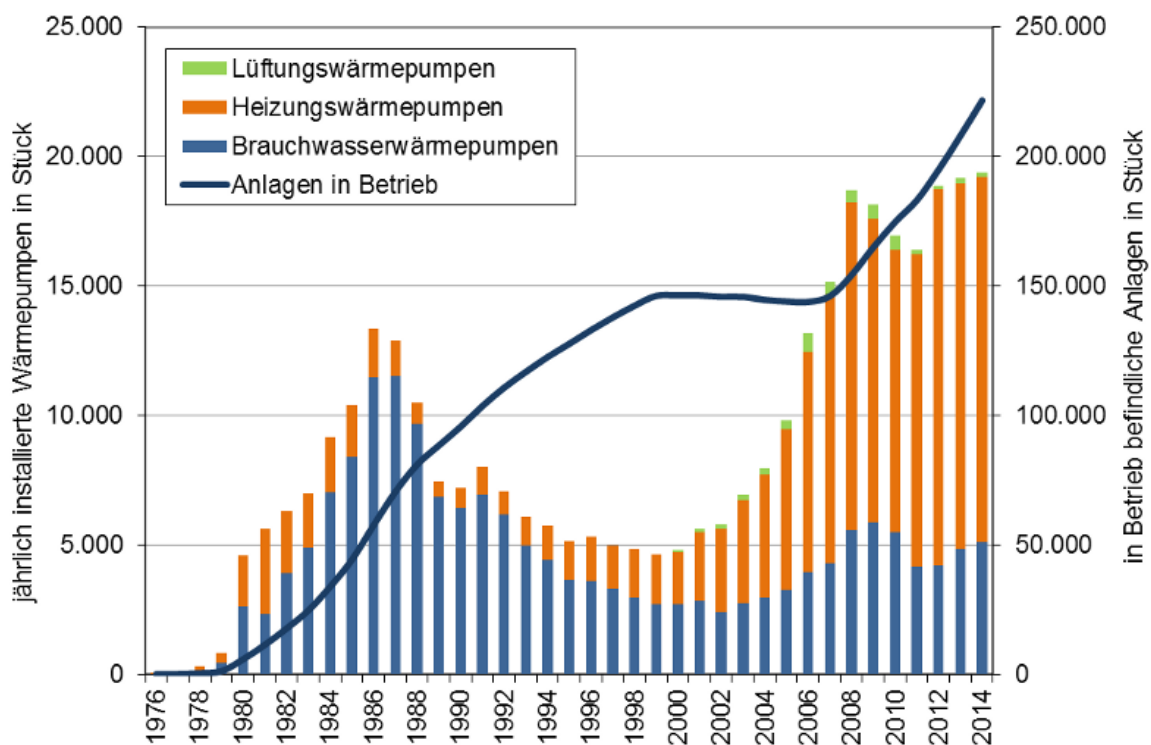


Abbildung 8: Marktentwicklung der Wärmepumpentechnologie in Österreich (entnommen aus [20]) Quelle: EEG

Ein neuerlicher Anstieg der Verkaufszahlen lässt sich ab dem Jahr 2001 verzeichnen, vor allem im Bereich der Heizungswärmepumpen. Diese Zielgruppe dominiert zu der heutigen Zeit die Verkaufszahlen am österreichischen Markt gegenüber der Brauchwasser- und der Lüftungswärmepumpe. Der Grund liegt darin, dass die *WWB* heutzutage oftmals in Kombination mit der Heizungswärmepumpe erfolgt, was jedoch auch mit einer Reduzierung der *JAZ* und somit mit einer schlechteren Effizienz des Gesamtsystems verbunden ist.

Die Hintergründe des erneuten Wachstums ab dem Jahr 2001 liegen zum einen in der Weiterentwicklung der Technologie, Einführung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Installation und zum anderen an den günstigen energietechnischen bzw. thermodynamischen Randbedingungen beim Einsatz von Heizungswärmepumpen in modernen, energieeffizienten Gebäuden mit geringem *HWB* und niedrigen *VLT*, welche ebenfalls ab dem Jahr 2001 mit einer starken Marktdiffusion gekennzeichnet sind [20].

4 Die Theorie der Wärmepumpe

Kapitel 4 dient dazu, das Grundprinzip und die damit verbundene Funktionsweise der *WP* zu erklären. Des Weiteren werden die für diese Arbeit notwendigen und grundlegenden Bestandteile einer *WP* näher beschrieben. Anschließend werden die wichtigsten Kennzahlen für die Bewertung und Beschreibung einer *WP* gezeigt. *Kapitel 4.3* beschäftigt sich ausführlich mit dem Kälteprozess der *WP*. Dabei wird die Berechnung der Carnot'schen Leistungszahl erläutert sowie der ideale und der reale *KP* gegenübergestellt. Am Ende dieses Kapitels werden gängige Kältemitteltypen angeführt, welche in der heutigen Haustechnik üblich sind und auch weitestgehend die vielzähligen Anforderungen, die an das Kältemittel gestellt werden, erfüllen. Abschließend ist noch ein Bezeichnungsschema nach der Klassifizierung der *WP* dargestellt.

4.1 Funktionsweise – das Prinzip der Wärmepumpe

Grundsätzlich lässt sich das Funktionsprinzip der *WP* mit dem eines Kühlschranks vergleichen, jedoch nur in umgekehrter Arbeitsweise. Während der Kühlschrank seinem Innenraum, also den Lebensmitteln die Wärme entzieht und über die Rückseite nach draußen abführt, entzieht die *WP* ihre Wärme der Umgebung (Wasser, Erdreich, Luft) und gibt diese plus die Antriebsenergie in Form von Heizenergie an das Wärmeverteilsystem (Heizkreis) ab [09].

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kann Wärme nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen. Dafür ist Fremdenergie notwendig. Wie in *Abbildung 9* grafisch dargestellt wird durch die *WP* Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau umgewandelt. Es gilt: Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen *WQ* (z.B. Grundwasser ca. 10°C) und Wärmeabgabesystem (z.B. *VLT* ca. 35°C bei *FBH*), desto weniger Energie benötigt die *WP*, umso wirtschaftlicher arbeitet sie und umso geringer fallen die jährlichen *BK* aus. Für die *WWB* ist eine höhere *VLT*, nämlich 55°C notwendig. Somit muss die *WP* die Wärme auf ein höheres Temperaturniveau anheben als beim Heizen, was zumeist mit geringeren Arbeitszahlen und höheren Kosten verbunden ist. [17] S. 9, S.10

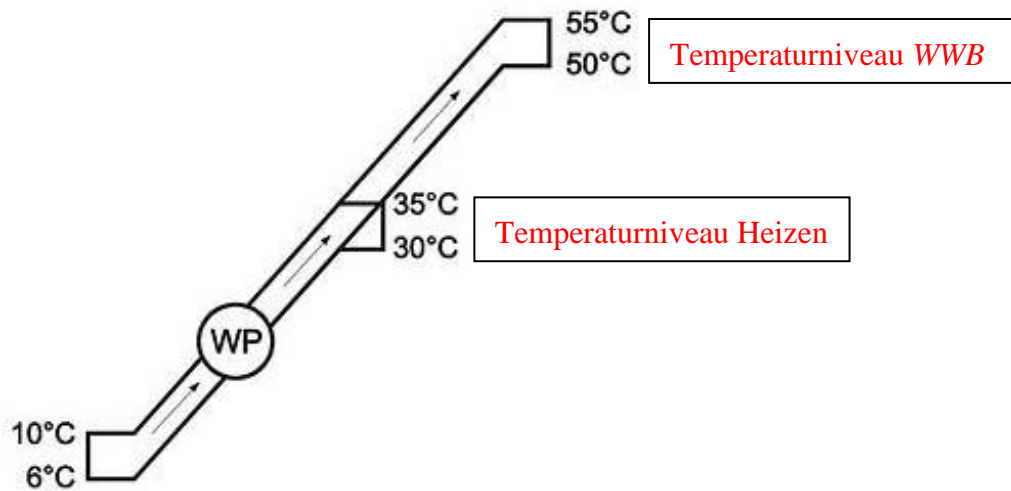


Abbildung 9: Temperaturniveaus einer Wärmepumpe (entnommen aus [17] S. 9)

Der Temperaturanstieg findet dabei in einem geschlossenen *Kreisprozess KP* durch ständiges Ändern des Aggregatzustands des Arbeitsmittels (Verdampfen, Komprimieren, Verflüssigen, Expandieren – vgl. *Abbildung 10*) statt [33].

4.1.1 Aufbau einer Wärmepumpe und deren Komponenten

Abbildung 10 zeigt die vier grundlegenden Bestandteile einer *WP*. Diese sind: Verdampfer, Verdichter mit Antriebsmotor (i.d.R. vollhermetischer Scroll-Verdichter oder Kolbenverdichter), Kondensator (auch Verflüssiger genannt) und Expansionsventil, deren Aufgaben in diesem Kapitel näher beschrieben werden [17] S. 10.

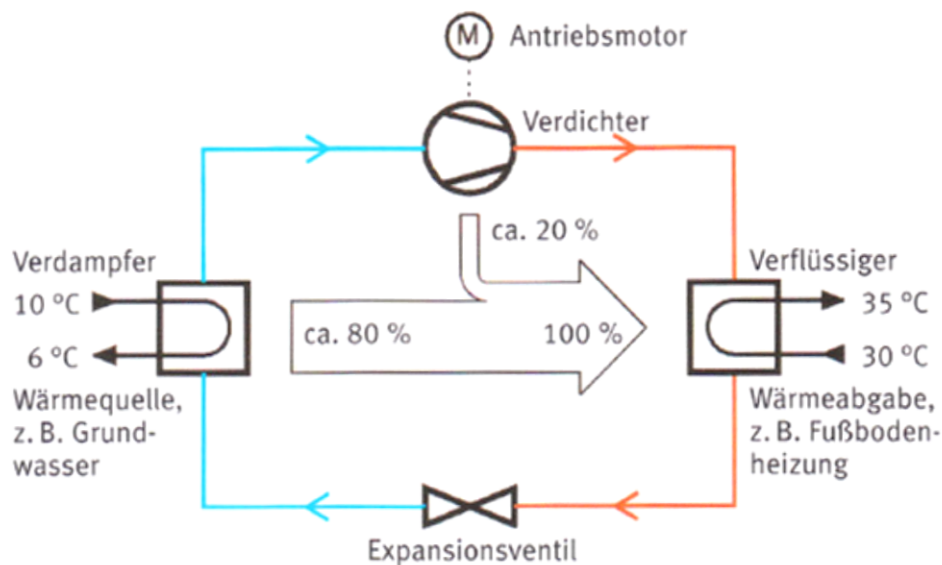


Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau einer Wärmepumpe (entnommen aus [17] S.10)

Wie bereits in *Kapitel 3.4* erwähnt und in *Abbildung 10* ersichtlich, entzieht die *WP* etwa 75-80% der erforderlichen Heizenergie kostenlos aus der Umwelt. Die restlichen 25-20% werden für die Antriebsleistung des Verdichters in Form von elektrischem Strom aufgewendet, um 100% Nutzwärme zu generieren. Dies bedeutet: um beispielsweise 4 kW Heizleistung aufbringen zu können, ist 1 kW elektrische Leistung notwendig, da 3 kW Wärmeleistung aus der Umwelt bezogen wird.

Prinzipiell erfolgt der technische Kältekreislauf einer jeden *WP* in vier Schritten, in denen das Kältemittel verschiedene *ZÄ* einnimmt (vgl. *Abbildung 10* bzw. *Abbildung 13*):

1. Verdampfen

Im Verdampfer, i.d.R. ein Plattenwärmetauscher, nimmt das flüssige, sehr kalte Kältemittel Energie von der *WQ* (Wasser, Erde oder Luft) auf und verdampft mit zunehmender Temperatur. Es erfolgt somit ein Übergang vom flüssigen in einen dampfförmigen Zustand.

2. Verdichten

Der Kompressor saugt das gasförmige Kältemittel an, wodurch unter Zufuhr elektrischer Energie das nun dampfförmige Kältemittel auf hohen Druck verdichtet und dadurch erhitzt wird. Das Kältemittel verlässt als sogenanntes Heißgas den Verdichter.

3. Verflüssigen

„Das dampfförmige Kältemittel wird mit hoher Temperatur in den Kondensator – wiederum ein Wärmetauscher – gedrückt und gibt dort seine Wärme an das Heizungswasser ab.“ Dabei kondensiert der Kältemitteldampf.

4. Entspannen

Im Expansionsventil wird das nun flüssige Kältemittel entspannt, wodurch sich wieder der Ausgangsdruck einstellt. Die Temperatur des Kältemittels nimmt dadurch ebenfalls abrupt ab. Das kalte, flüssige Kältemittel wird dem Verdampfer zugeführt und der Kreislauf beginnt erneut [33] [10].

Neben den bereits erwähnten Grundbestandteilen setzt die *WP* für einen sicheren Betrieb noch weitere Komponenten wie z.B. Sicherheitsorgane (Hoch- und Niederdruckschalter), Kältemittelsammler, Temperaturfühler, Trockner und Schauglas voraus [17] S. 11.

4.2 Wichtige Kennzahlen und deren Zusammenhang

4.2.1 Leistungszahl \mathcal{E}

Die Effizienz einer *WP* wird durch Ihre Leistungszahl \mathcal{E} bestimmt und wie folgt ausgedrückt:

$$\text{Leistungszahl } \mathcal{E} = \frac{\text{Heizleistung}}{\text{el. Antriebsleistung}} = \frac{P_H}{P_F} = \text{COP} \quad (4.1)$$

Die Leistungszahl wird auch oft mit *COP* (coefficient of performance) bezeichnet und gibt das Verhältnis von erzeugter Heizleistung P_H (in *kW*) zur elektrischen Antriebsleistung P_F (in *kW*) der *WP* an (vgl. *Formel 4.1*). Hierbei handelt es sich um eine einheitslose Größe. Der Wert $\mathcal{E}=4$ bedeutet, dass das 4-fache der eingesetzten elektrischen Energie in nutzbare Wärmeenergie umgesetzt werden kann. Bei dieser Kennzahl handelt es sich um einen zeitlich veränderbaren Momentanwert, der die Wirksamkeit der *WP* zu einem bestimmten Betriebspunkt (z.B. B0/W35 siehe *Kapitel 4.5*) bei vorgegebenen Rahmenbedingungen bestimmt. Die Leistungszahl ist für die Praxis eher unbedeutend. Die *COP*-Werte können aus den technischen Datenblättern der Herstellerfirmen entnommen werden [12] S. 70.

4.2.2 (Jahres-) Arbeitszahl β

Die Arbeitszahl ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der gelieferten Nutzenergie in Form von Heizwärme und der elektrischen Antriebsenergie aller Komponenten wie z.B. Primärpumpe, Sekundärpumpe oder Ladepumpe, usw. (vgl. *Formel 4.2*)

$$\text{Arbeitszahl } \beta = \frac{\text{Heizwärmearbeit (Nutzarbeit)}}{\text{eingesetzte Antriebsenergie}} = \frac{Q_H}{Q_F} \quad (4.2)$$

Bezieht sich dieses Verhältnis auf ein ganzes Jahr, spricht man von der Jahresarbeitszahl *JAZ*. Ihre Berechnung erfolgt nach der dafür gültigen Norm VDI 4650 Blatt 1 (2009)⁷. Im Gegensatz zur Leistungszahl handelt es sich bei der Arbeits- bzw. *JAZ* um eine aussagekräftige Beschreibung der Effizienz von *WP*, die auch zur Bewertung und zur Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs (in *kWh/a*) herangezogen wird. Diese Kennzahl kann nicht vom *WP*-Hersteller angegeben werden, da es sich bei der *JAZ* um einen gebäude- und

⁷ VDI 4650 = Verein Deutscher Ingenieure (nähere Informationen siehe Glossar)

anlagenspezifischen Wert handelt. Im praktischen Teil dieser Arbeit – beginnend mit *Kapitel 6* – erfolgt ihre Berechnung mit dem Berechnungstool *JAZCalc*.

Die *JAZ* ist nicht nur alleine von der Leistungszahl (*COP*) der *WP* abhängig, sondern auch maßgeblich von der Temperaturdifferenz zwischen *WQ* und *WNA* (Temperaturhub). Wie bereits erwähnt gilt: Je höher dieser Temperaturunterschied ist, desto kleiner werden die *COP*- und *JAZ*-Werte, was sich wiederum auf eine schlechtere Anlageneffizienz rückführen lässt, da mehr Strom für den Antrieb der Pumpe benötigt wird.

Abbildung 11 stellt den grafischen Verlauf der Leistungszahl \mathcal{E} in Abhängigkeit vom Temperaturhub dar.

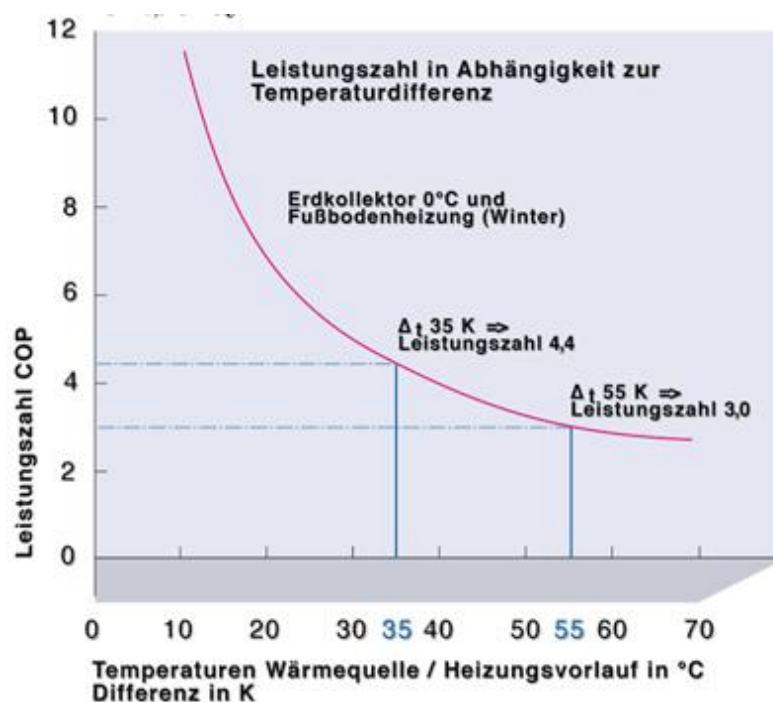


Abbildung 11: Leistungszahl in Abhängigkeit vom Temperaturhub (entnommen aus [23])

Die Grafik offenbart, dass grundsätzlich hohe *WQ*-Temperaturen (Erdreich oder Grundwasser) sowie niedrige Heizungs-*VLT* – was z.B. bei *FBH* oder Wandheizungen der Fall ist – anzustreben sind. Laut *Abbildung 11* würde sich bei einer Temperaturspreizung von 35 K (z.B. im Betriebspunkt B0/W35), eine Leistungszahl $\mathcal{E} \sim 4,4$ einstellen.

Die erreichbare *JAZ* ist i.d.R. immer etwas geringer als der *CPO*-Wert der *WP*. Sie wird zusätzlich vom Benutzerverhalten, der anteiligen *WWB* am Gesamtwärmebedarf sowie der Abstimmung aller Anlagenkomponenten zueinander, beeinflusst. Letztere spielt eine entscheidende Rolle, um entsprechend hohe *JAZ* zu erhalten [12] S. 70; [2] S. 14,15.

4.3 Der Kälteprozess einer Wärmepumpe

4.3.1 Der Carnot'sche Vergleichsprozess

Der *KP* einer *WP* folgt im Wesentlichen linkslaufend dem in *Abbildung 12* dargestellten Carnot-Prozess⁸. Es handelt sich dabei um einen idealen *KP*, der aus zwei *Isothermen* (Temperatur $t = \text{konstant}$) und zwei *Isentropen* (*Entropie* $s = \text{konstant}$) *ZÄ* besteht. In der Praxis ist der Carnot-Prozess jedoch kaum realisierbar. Es gibt daher vergleichsweise keine Maschine, in der er je verwirklicht wurde.

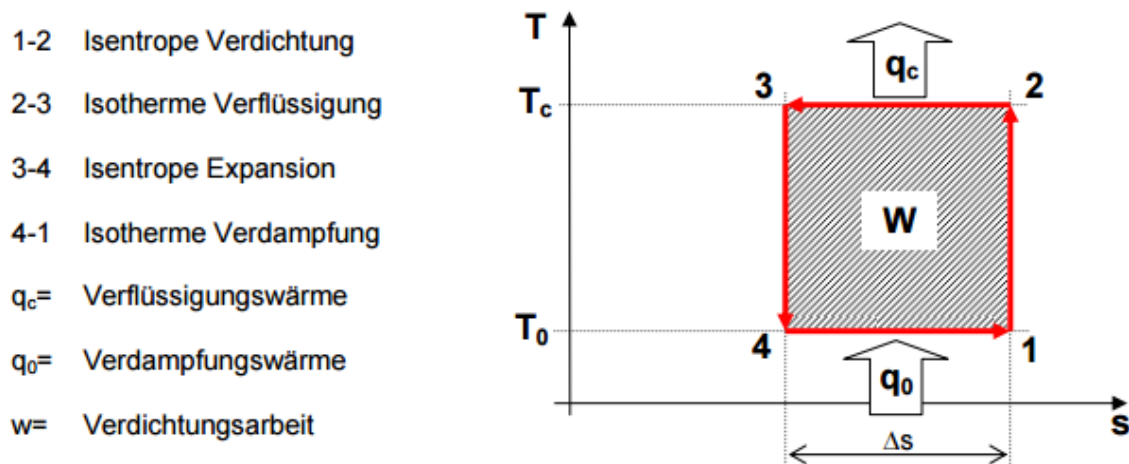


Abbildung 12: Der Carnot-Prozess im T-S-Diagramm (entnommen aus [11] S.5)

Anhand der oben dargestellten Grafik lässt sich die Carnot'sche Leistungszahl \mathcal{E}_c über die Temperaturdifferenz zwischen *WQ* (Verdampfer) und *WNA* (Kondensator), entsprechend *Formel 4.3* ausdrücken [11] S. 5; [2] S. 13.

$$\mathcal{E}_c = \frac{T_c}{T_c - T_0} = \frac{T_c}{\Delta T} \quad (4.3)$$

Da es sich nach Carnot um einen idealen *KP* handelt, sprich keine Verluste der Geräte berücksichtigt werden, ist der Wert entsprechend *Formel 4.3* in erster Näherung zu halbieren. Für die Leistungszahl \mathcal{E} ergibt sich somit mit hinreichender Genauigkeit:

$$\mathcal{E} = 0,5 * \mathcal{E}_c \quad (4.4)$$

⁸ Carnot-Prozess = idealer Vergleichsprozess mit dem theoretisch höchst möglichen thermischen Wirkungsgrad

4.3.2 Der Wärmepumpenprozess im log p-h-Diagramm

In der Praxis wird der Wärmepumpenprozess üblicherweise im log p-h-Diagramm dargestellt (vgl. *Abbildung 13*). Auf der y-Koordinate wird der Druck p logarithmisch aufgetragen, auf der x-Koordinate die Enthalpie h. Die linke Grenzkurve, auch Siedelinie genannt, stellt die Trennung zwischen flüssiger Phase und dem Nassdampfgebiet dar. Die rechte Grenzkurve, auch Taulinie genannt, stellt die Grenzkurve zwischen dem Nassdampfgebiet und der Dampfphase dar. Da es sich nach *Abbildung 13* ebenfalls um einen idealen KP handelt, der entlang des Kurvenzuges 1-2-2'-3-4 verläuft, wird das Kältemittel als ideales Gas betrachtet und die Geräte arbeiten verlustfrei [11] S. 6,7; [2] S. 16.

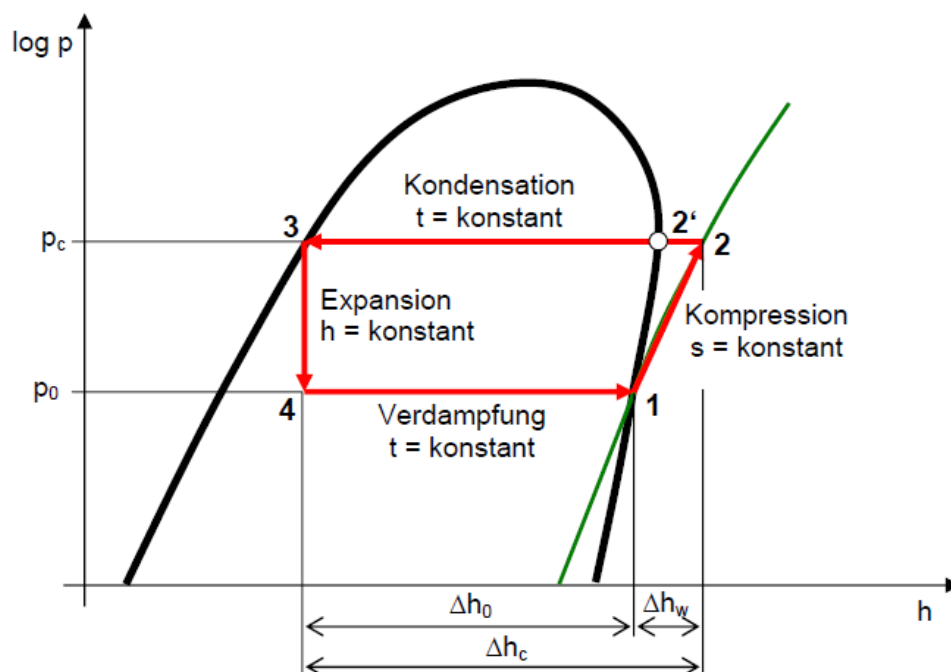


Abbildung 13: Idealer Vergleichsprozess im log p-h-Diagramm (entnommen aus [11] S.6)

Zustandsänderungen des idealen KP:

- 1 → 2: *isentrop*e Kompression mit Überhitzung
- 2 → 2': Wärmeabgabe des überhitzten Kältemittels
- 2' → 3: Verflüssigung des Kältemittels bei konstanter Temperatur
- 3 → 4: Entspannung bei konstanter *Enthalpie*
- 4 → 1: Verdampfung bei konstanter Temperatur

Anhand der jeweiligen Enthalpie-Differenzen Δh die aus dem log-p-h-Diagramm hervorgehen, können die jeweiligen Leistungen für Verdichter, Verflüssiger und Verdampfer berechnet werden.

Die (Carnot'sche) Leistungszahl für den idealen Prozess ergibt sich wie folgt:

$$\varepsilon_c = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (4.5)$$

Wie auch bereits oben erklärt, kann man überschlägig davon ausgehen, dass ε in etwa halb so groß ist wie ε_c (vgl. Formel 4.6)

$$\varepsilon = 0,5 * \varepsilon_c \quad (4.6)$$

Ideale Prozesse sind aber in der Praxis nicht realisierbar. Beim realen WP-Prozess (Abbildung 14) wird daher die zu erreichende Leistungszahl ε geringer ausfallen, da hier die mechanischen, thermischen, volumetrischen und elektrischen Verluste sowie der Energiebedarf für diverse Hilfsantriebe berücksichtigt werden.

Abbildung 14 zeigt den realen WP-Prozess mit Sauggasüberhitzung 1-1* und Flüssigkeitsunterkühlung 3-3*.

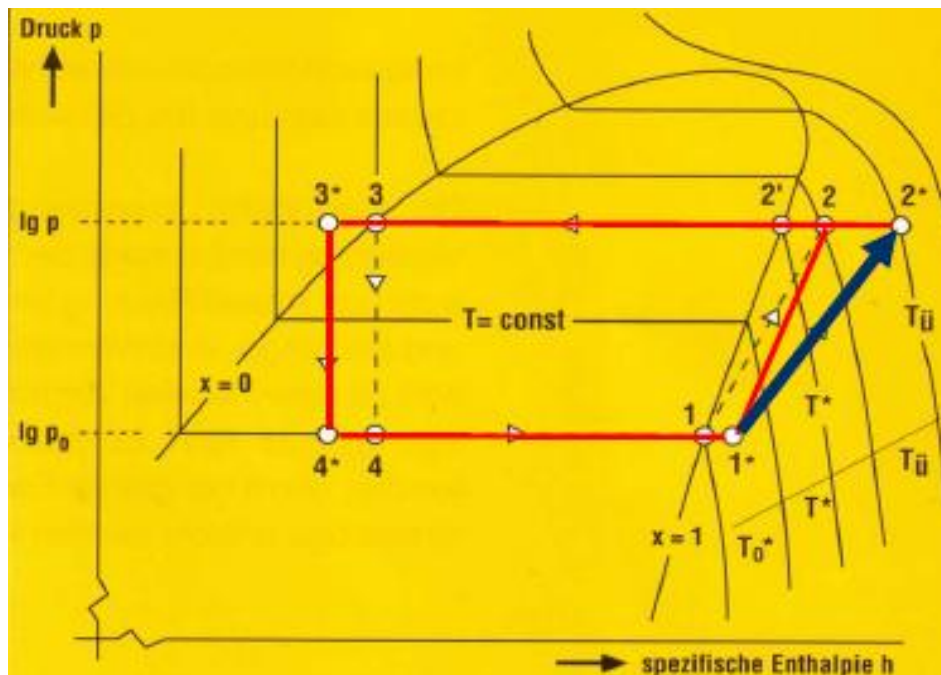


Abbildung 14: Realer Prozess im log p-h-Diagramm (entnommen aus [14] S.41)

Wie aus *Abbildung 14* hervorgeht erfolgt das Verdichten beim realen Prozess – aufgrund innerer Reibung des Arbeitsmitteldampfes und Verlusten im Verdichter – nicht entlang der Line 1-2, sondern verläuft flacher, nämlich entlang von 1*-2*. Die Verdichtung erfolgt dabei *polytrop*. Dies führt zu einer höheren Verdichtungstemperatur bei konstantem Verflüssigungsdruck, was wiederum eine höhere Verdichtungsarbeit erfordert, um den gleichen Enddruck zu erreichen. Dies erklärt somit die geringeren Leistungszahlen im Vergleich zum idealen Prozess [14] S. 41,42; [2] S. 14,16.

Zustandsänderungen des realen KP:

- 1 → 1*: Sauggasüberhitzung
- 1* → 2*: *polytrope* Verdichtung mit Überhitzung
- 2* → 2': Abkühlung des überhitzten Kältemittels
- 2' → 3: Verflüssigung des Kältemittels
- 3 → 3*: Flüssigkeitsunterkühlung
- 3* → 4*: Entspannung bei konstanter *Enthalpie*
- 4* → 1: Verdampfung des Kältemittels

Die (Carnot'sche) Leistungszahl für den realen Prozess ergibt sich wie folgt:

$$\varepsilon_c = \frac{h_{2*} - h_{3*}}{h_{2*} - h_{1*}} \quad (4.7)$$

Auch hier gilt analog wie oben, dass ε in etwa halb so groß ist wie ε_c (vgl. *Formel 4.6*).

4.4 Arbeitsmittel

Als Arbeitsmittel wird das Kältemittel bezeichnet, welches den Wärmepumpenkreisprozess durchläuft. Über einige Jahre hinweg wurde *FCKW* als Kältemittel verwendet. Aus ökologischen Hintergründen und der Tatsache, dass dieses die Ozonschicht der Atmosphäre schädigt, ist *FCKW* als Kältemittel in Österreich verboten. Es kommen daher ausschließlich chlorfreie Arbeitsmittel zum Einsatz, welche bei niedrigen Temperaturen verdampfen

und gleichzeitig eine hohe innere Wärme besitzen.

R 134a, R 407C und R410A – welche in der heutigen Haustechnik üblich sind – haben keinerlei ozonschädigende Wirkung (ODP=0) und sind zudem unbrennbar und ungiftig. Das damit verwendete Esther-Öl ist biologisch abbaubar, was eine bedenkenlose Aufstellung in allen Räumen ermöglicht. Je nach Art des einzusetzenden Kältemittels, stellen sich unterschiedliche Vor- und Nachteile ein. Bei WP mit brennbaren Arbeitsmitteln hingegen, wie z.B. Propan, gelten Einschränkungen und Aufstellungsrichtlinien [2] S. 15.

4.5 Bezeichnung von Wärmepumpen

Die Klassifizierung der WP erfolgt anhand von *Abbildung 15*. Nachfolgend werden die gängigsten Wärmepumpentypen angeführt. Die Codierung besteht aus einer Kombination von zwei Buchstaben (Medium WQ und WNA) und zwei Zahlen (Temperatur WQ und WNA).

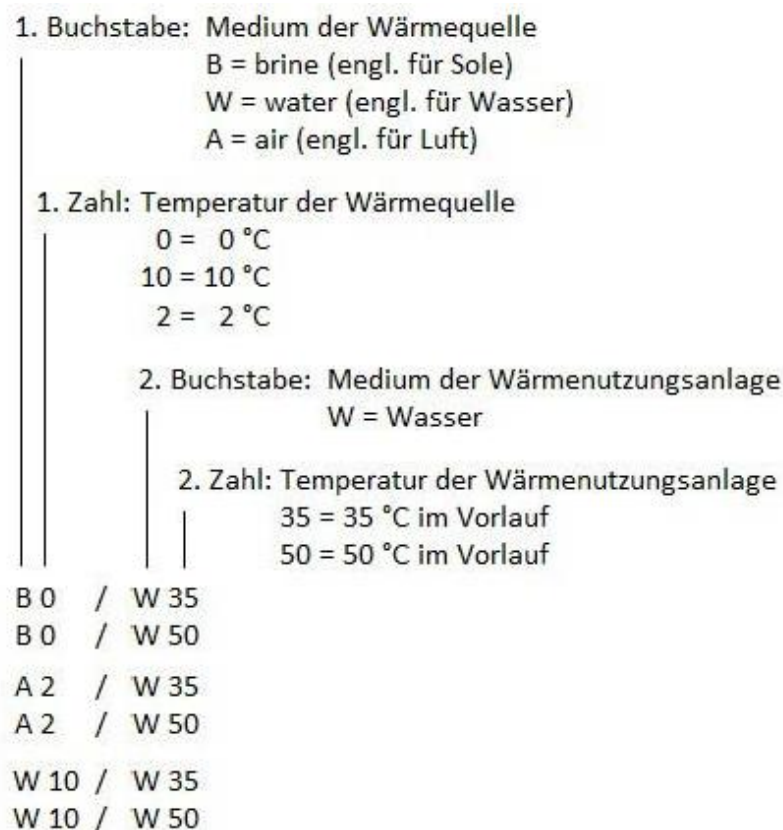


Abbildung 15: Bezeichnungsschema von WP (entnommen aus [18] S. 33)

So handelt es sich z.B. bei der Codierung W10/W35, wie in *Abbildung 15* ersichtlich, um eine Wasser/Wasser-WP mit einer Quelltemperatur von 10°C und einer VLT von 35°C.

5 Vorstufe zur Planung der WPA

Bevor mit der Dimensionierung der verschiedenen *WPS* im Hinblick auf das fiktive Musterhaus begonnen werden kann, werden in *Kapitel 5* die dafür notwendigen Vorkenntnisse beschrieben. So werden u.a. der Aufbau einer *WP*-Heizanlage und dessen Bestandteile dargestellt, die gängigsten *WQ* präsentiert sowie die möglichen Betriebsweisen von *WP* erläutert. Ebenso werden die für diese Arbeit relevanten Komponenten der *WNA* erklärt und die wichtigsten energetischen Gebäudetypen veranschaulicht.

5.1 Aufbau einer Wärmepumpen-Heizanlage

Abbildung 16 zeigt die drei grundsätzlichen Bestandteile einer *WP*-Heizungsanlage:

- *WQA* – Wärmeentzug aus der Umgebung (Erdreich, Wasser, Luft)
- *WP* – Anhebung des Temperaturniveaus für Heiz- und *WWB*-Zwecke
- *WNA* – Abgabe der Heizleistung an die Heizkreise (Flächenheizung, Radiatoren)

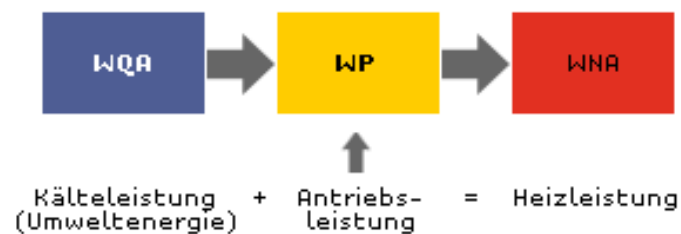


Abbildung 16: Wärmepumpen-Heizanlage (entnommen aus [6])

Wichtig dabei ist es, auf eine optimale Abstimmung aller Komponenten zu achten, um eine entsprechende effiziente Gesamtanlage und die damit verbundenen hohen Leistungszahlen zu erhalten. Dies gewährt ebenso einen reibungslosen Betrieb mit niedrigsten *BK* [6].

5.2 Wärmequellen einer Wärmepumpe

Vorweg ist zu sagen, dass grundsätzlich die *WQ* mit dem höchstmöglichen Temperaturniveau anzustreben ist. Dadurch ergeben sich höchstmögliche Leistungszahlen, maximale Wirkungsgrade sowie niedrigste *BK* für den Verbraucher [2] S. 37.

Abbildung 17 zeigt die gängigsten *WQ*, die von der *WP* zur Aufnahme der Umweltwärme genutzt werden können.

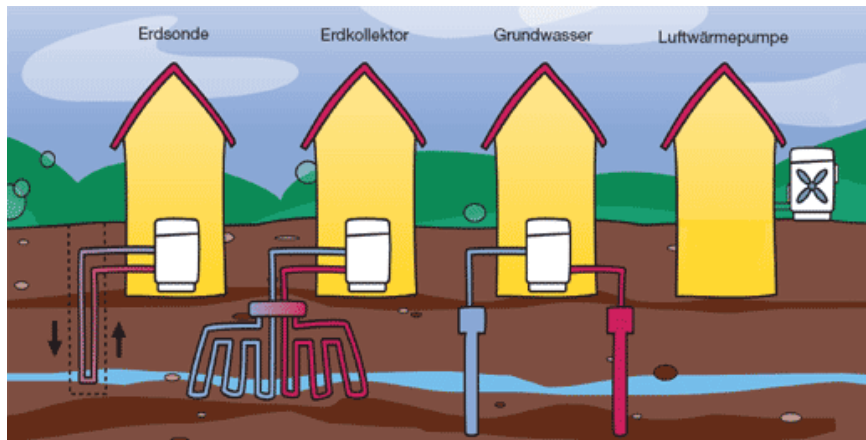


Abbildung 17: Wärmequellen für Wärmepumpen (entnommen aus [15])

Je nach Art der eingesetzten *WQ* unterscheiden sich die Systeme hinsichtlich der Anschaffungs- und der laufenden *BK*, aber auch hinsichtlich der Aufstellungsart sowie der geologischen/hydrologischen und rechtlichen Anforderungen [9].

Für die anschließende Projektierung in *Kapitel 6* werden in den nachfolgenden Unterkapiteln die wichtigsten *WQ* näher erläutert.

5.2.1 Wärmequelle Wasser – Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe

Mit der *WQ* Wasser können bei optimaler Auslegung aller Anlagenkomponenten die höchsten Arbeitszahlen (*COP*, *JAZ*) erreicht werden. Der Grund liegt darin, dass Grundwasser ab einer Tiefe von etwa 10 Meter aufgrund seines relativ hohen und konstanten Temperaturniveaus ganzjährig mit einer Temperatur von etwa 10°C zur Verfügung steht. Grundwasser-*WP* werden aufgrund ihrer relativ geringen Temperaturspreizung Δ_T ⁹ hauptsächlich monovalent betrieben. Grundwasser zählt somit als ideale *WQ*; die Tatsache, dass sich mit diesem System die höchstmöglichen Leistungszahlen einstellen, ist auch anhand der Leistungskurve nach *Abbildung 11* – siehe *Kapitel 4.2.2* – ersichtlich.

- **Funktion**

Das Grundwasser wird dem Förderbrunnen entnommen und dem Verdampfer der *WP* zugeführt. Dabei wird dem Wasser Wärme entzogen und auf ein für Heizzwe-

⁹ Richtwerte: ΔT Heizen: 25°C, ΔT WWB: 40-45°C [12] S. 78

cke nutzbares Temperaturniveau gebracht. Anschließend wird das um etwa 3°C abgekühlte Grundwasser in den mindestens 10-15 Meter entfernten Sickerbrunnen zurückgepumpt und so dem Grundwasserstrom wieder zugeführt. Dieser Mindestabstand ist notwendig, um einen thermischen Kurzschluss im Wasserfluss zu vermeiden. Bei dieser *WQA* handelt es sich um ein offenes System. [7]; [12] S. 78.

- **Voraussetzungen**

Grundwasser muss in ausreichender Menge, vertretbarer Tiefe und entsprechender Qualität zur Verfügung stehen. Bei schlechter Wasserqualität können Filter vorgesehen werden, diese müssen jedoch relativ häufig gereinigt werden und verschlechtern zumeist die Arbeitszahl der *WP*. Eine Wasseranalyse ist somit obligatorisch um spätere Folgeschäden und Korrosionsschäden an der Anlage zu vermeiden.

Die Erschließung von Grundwasser als *WQ* ist bewilligungspflichtig. Der Einsatz einer Wasser-Wasser-*WP* lohnt sich vorwiegend bei größeren Gebäuden mit hohem Heiz- und Warmwasserbedarf, aufgrund des verhältnismäßig hohen Planungs- und Forschungsaufwandes im Vorfeld [12] S. 79.

5.2.2 Wärmequelle Erdreich – Die Sole-Wasser-Wärmepumpe

Ist der Einsatz von Grundwasser auszuschließen, können mit der *WQ* Erdreich ebenfalls relativ hohe und vernünftige *JAZ* erreicht werden [2] S. 37. Erdwärmepumpen nutzen die im Erdreich gespeicherte Sonnenenergie mit einer relativ konstanten Bodentemperatur ab einer Tiefe von 15 Metern über das ganze Jahr hinweg – auch an sehr kalten Wintertagen. Der jahreszeitliche Verlauf der Erdreichtemperatur ist in *Abbildung 18* ersichtlich.

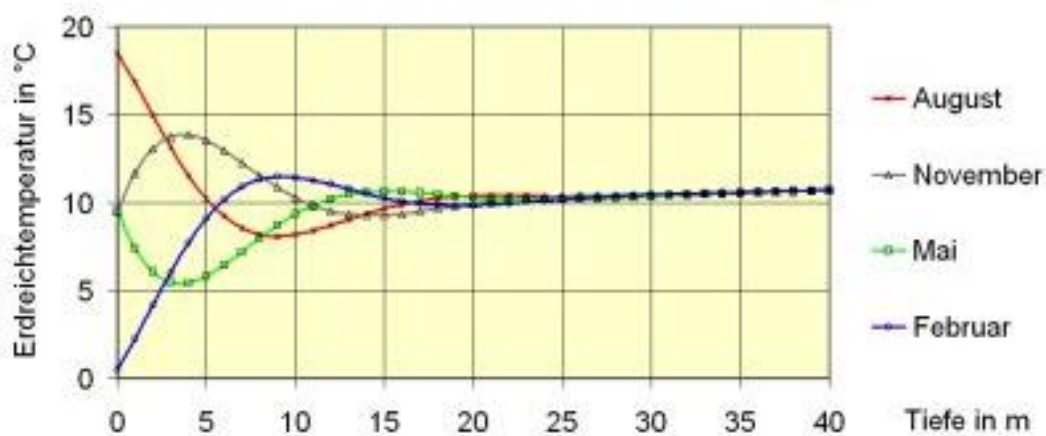


Abbildung 18: Jahrestemperaturverlauf im Erdreich (entnommen aus [16])

Wie man der *Abbildung 18* entnehmen kann, treten ab einer Tiefe von etwa 15 Metern kaum noch Temperaturschwankungen im Erdreich auf. Es herrscht somit eine nahezu konstante Temperatur von etwa 10°C ¹⁰.

Selbst im ungünstigsten Fall (z.B. im Februar) bietet sich das Erdreich - im Vergleich zur *WQ* Luft – als *WQ* mit doch relativ hohem Temperaturniveau von etwa 0°C an. Somit werden Erdgekoppelte *WP* ebenfalls zumeist monovalent betrieben. Für die Aufnahme der Erdwärme gibt es zwei mögliche Systeme: Erdsonden, welche vertikal über eine Tiefenbohrung eingebracht werden oder Erdkollektoren, welche horizontal großflächig verlegt werden. Anders als bei der *WQ* Grundwasser handelt es sich hierbei um geschlossene Systeme, welche nachfolgend etwas näher erläutert werden [16]; [17] S. 96.

- Erdsonden

U-förmige PE-Rohre werden in eine vertikale Bohrung ca. 20 bis 150 Meter tief ins Erdreich eingebracht und anschließend mit hochleitfähigem Betonit-Zement-Gemisch verpresst. In diesem Kunststoffrohren zirkuliert die Sole, also ein frostsicheres Glykol-Wasser-Gemisch. Erdsonden eignen sich besonders gut bei kleinen Grundstücken, da für die Bohrung nur ein geringer Platzbedarf erforderlich ist. Die erforderliche Tiefe der Bohrung und die damit verbundene Sondenlänge (rechnerische Ermittlung vgl. *Formel 5.1*), sind vom Wärmebedarf des Gebäudes sowie der Wärmeleitfähigkeit des Bodens abhängig [12] S. 81. In *Tabelle 2* ist die spezifische Entzugsleistung in Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit und der jährlichen Betriebsstunden dargestellt.

Spezifische Entzugsleistung von Erdsonden			
Bodenbeschaffenheit	spez. Entzugsleistung		Aufnahmeleistung
	1800h/a	2400h/a	
Trockener Sand, Kies	< 25 W/m	< 20 W/m	< 10 W/m
Trockenes Lockergestein	20 – 25 W/m	15 – 20 W/m	9 – 12 W/m
Trockener Ton, Lehm	20 – 30 W/m	20 – 25 W/m	12 – 19 W/m
feuchter Ton, Lehm	35 – 50 W/m	30 – 40 W/m	18 – 25 W/m
Festgestein mit geringer Wärmeleitung	40 – 45 W/m	35 – 40 W/m	21 – 28 W/m
Wasserführendes Lockergestein	50 – 55 W/m	45 – 50 W/m	28 – 31 W/m
Kalksandstein	55 – 70 W/m	45 – 60 W/m	28 – 37 W/m
wasserführenden Sand, Kies	65 – 80 W/m	55 – 75 W/m	34 – 40 W/m
Sandstein	60 – 70 W/m	55 – 65 W/m	34 – 40 W/m
Saure Magnetite (z.B. Granit)	65 – 85 W/m	55 – 70 W/m	37 – 43 W/m
Basische Magnetite (z.B. Basalt)	40 – 65 W/m	35 – 55 W/m	20 – 38 W/m
Gneis	70 – 85 W/m	60 – 70 W/m	35 – 40 W/m

Tabelle 2: Entzugsleistung von Erdsonden gem. VDI 4640 (entnommen aus [17] S. 98)

¹⁰ Temperaturanstieg etwa alle 33m um ca. 1°C [12] S. 81

Bei entsprechender Bemessung der Erdsonde und des Heizungssystems ist die Anlage etwa 1800 bis maximal 2400 Betriebsstunden pro Jahr im Einsatz. Ansonsten besteht die Gefahr der Vereisung der Sonden [12] S. 81-83.

Die notwendige Länge der Sonde kann nach der *Formel 5.1* rechnerisch ermittelt werden [17] S. 98, S. 99:

$$\text{Sondenlänge} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{spez. Entzugsleistung}} = \frac{P_K}{P_{\text{spez}}} = L \text{ [m]} \quad (5.1)$$

- Erdkollektor

Stehen größere Grundstücksflächen zur Verfügung, bieten sich Erdkollektoren, auch Flächenkollektor genannt, als das zumeist einfachere und kostengünstigere System zur Erschließung von Erdwärme an. Auch hier erfolgt die Wärmeaufnahme über ein Kunststoffrohrsystem, welches mäanderförmig in einer Tiefe von ca. 1,5 Meter (entspricht ca. 40 Zentimeter unter der örtlichen Frostgrenze) großflächig verlegt wird. Der Verlegeabstand der Rohre sollte dabei zwischen 30-80 Zentimeter liegen. Die erforderliche Kollektorfläche (rechnerische Ermittlung vgl. *Formel 5.2*) für den Wärmeentzug richtet sich nach dem benötigten Wärmebedarf des Gebäudes für Heizung und *WWB*. Es gilt: Je feuchter der Boden, desto effizienter arbeitet die Anlage, umso höhere Leistungszahlen können erreicht werden (siehe *Tabelle 3*) und umso geringer fällt die Fläche für den Erdkollektor aus [12] S. 85.

Spezifische $P_{K_{\text{spez}}}$ Entzugsleistungen von Erdkollektoren		
Bodenart	Entzugsleistung bei 1.800 h/a(W/m ²)	Entzugsleistung bei 2.400 h/a(W/m ²)
trockener Sand, Kies	8 - 12 W/m ²	6 - 10 W/m ²
feuchter Sand, Kies	15 - 20 W/m ²	12 - 16 W/m ²
trockener Ton, Lehm	20 - 25 W/m ²	15 - 20 W/m ²
feuchter Ton, Lehm	25 - 30 W/m ²	20 - 24 W/m ²
Wasser führende Böden	30 - 40 W/m ²	25 - 32 W/m ²

Tabelle 3: Entzugsleistung von Erdkollektoren gem. VDI 4640 (entnommen aus [17] S. 107)

Tabelle 3 zeigt, dass trockener Sandboden die geringste Entzugsleistung hat. Hier wäre der Einsatz eines Flächenkollektors nicht zielführend.

Die erforderliche Fläche für den Erdkollektor kann nach der *Formel 5.2* rechnerisch ermittelt werden [17] S. 107:

$$\text{Kollektorfläche} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{spez. Entzugsleistung}} = \frac{P_K}{P_{\text{spez}}} = A_K \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.2)$$

Der Vorteil gegenüber den Erdsonden liegt darin, dass teure Tiefenbohrungen entfallen und zudem keine Bewilligungen seitens der Wasserbehörde eingeholt werden müssen.

5.2.3 Wärmequelle Luft – Die Luft-Wasser-Wärmepumpe

Luft als *WQ* bringt den großen Vorteil mit sich, dass sie quasi überall und unbegrenzt verfügbar ist. Sie ist relativ einfach zu erschließen und somit die preiswerteste Bauform aller Wärmepumpentypen, da keine Bohrungen, Grabungen und besondere Bewilligungen erforderlich sind. Nachteilig kann sich die Geräusentwicklung von Ventilator und Kompressor zu den angrenzenden Nachbarsgrundstücken auswirken. Luftwärmepumpen nutzen entweder die Außenluft, die Raumluft eines Gebäudes (z.B. eines Kellers) oder auch die Abluft (z.B. einer Lüftungsanlage).

Ihr Einsatz bietet sich besonders bei Neubauten mit geringen Heizlasten aber auch parallel zu bestehenden Heizsystemen (z.B. nach Sanierungen von Altbauten) zur Deckung der Grundheizlast an. Luftwärmepumpen werden aufgrund der vergleichsweise niedrigen Quellentemperatur von etwa -5°C hauptsächlich bivalent betrieben [12] S. 74.

- Außenluft als *WQ*

Die Außenluft wird über einen Ventilator angesaugt und durch den Verdampfer der *WP* geblasen und dabei abgekühlt. Kennzeichnend für die Luft-Wasser-*WP* ist: „das nutzbare Wärmepotential der Außenluft nimmt umgekehrt proportional zum Wärmebedarf ab.“ Dies bedeutet, dass an sehr kalten Wintertagen – wo der Wärmebedarf am größten ist – die Effizienz der Anlage und somit die erreichbare Leistungszahl stark abnimmt und ein Betrieb daher meist nur bis zum sogenannten Bivalenzpunkt wirtschaftlich ist. Dieser liegt typischerweise bei $+5$ und -8°C Lufttemperatur. Danach wird die Wärmepumpe von einem zweiten Wärmeerzeuger unterstützt (z.B. E-Heizstab). Grundsätzlich kann man zwischen Kompakt-*WP* mit Ausführung für Außen- und Innenaufstellung und Split-*WP* unterscheiden. Letztere bringt den Vorteil mit sich, dass eine räumliche Trennung zwischen Verdampfer und *WP* stattfindet. Der Verdampfer wird dabei im Außenbereich aufgestellt, die *WP* Witterungsgeschützt im Inneren des Gebäudes. Die Verbindung zwischen Verdampfer und *WP* erfolgt über Kältemittelleitungen [6] [12] S. 74.

- Abluft als WQ

Abluft- WP nutzen die in der Raumluft gespeicherte Wärmeenergie, welche infolge von Transmissionswärme durch Personen, elektrische Geräte, Beleuchtung sowie über das Wärmeverteilsystem (FBH , Radiatoren, usw.) abgegeben wird. Sie werden in Kombination mit der kontrollierten Wohnraumlüftung eingesetzt. Dadurch steht eine WQ mit ähnlich hohem Temperaturniveau – wie es auch bei Grundwasser und Erdwärme der Fall ist – ganzjährig für die Heizung und WWB zur Verfügung. In diesem Fall spricht man von Luft-Luft- WP , deren Einsatz insbesondere bei PH interessant ist, jedoch in dieser Arbeit nicht näher behandelt wird [9].

5.3 Betriebsweisen

Nach Auswahl einer geeigneten WQ sind das System und zumeist auch die Betriebsweise festgelegt. Folgende Betriebsweisen können in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten sowie der zur Verfügung stehenden WQ realisiert werden:

- Monovalent

Der erforderliche Wärmebedarf für Heizung und WWB wird über das gesamte Jahr hinweg zu 100% durch die WP alleine gedeckt, selbst an kalten Wintertagen mit tiefen Außentemperaturen. Eine Zusatzheizung oder ein zweiter Wärmeerzeuger ist nicht im Einsatz. Monovalenter Betrieb erfolgt zumeist bei Anlagen mit WQ Wasser und/oder Erdreich und ist für VLT von max. 65°C geeignet [2] S. 41.

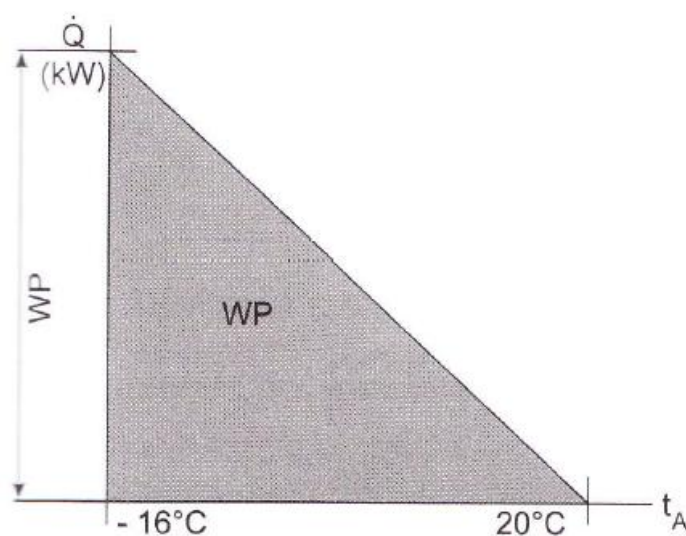


Abbildung 19: Monovalenter Betrieb (entnommen aus [2] S. 41)

Abbildung 19 stellt den Verlauf des monovalenten Betriebes dar. Dabei ist zu erkennen, dass je niedriger die Außentemperatur t_A , umso mehr Energie benötigt die WP, um den erforderlichen Wärmebedarf vollständig decken zu können.

- Bivalent-parallel

Hier ist neben der WP ein weiterer Wärmeerzeuger zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs erforderlich. Dies kann z.B. ein Holzkessel, Gaskessel oder auch ein Pelletofen sein. Die Grundversorgung wird durch die WP sichergestellt. Wird eine bestimmte Außentemperatur t_A unterschritten, heizt diese ab dem sogenannten Umschaltunkt UP (Bivalenzpunkt) gemeinsam mit dem Kessel (vgl. *Abbildung 20*).

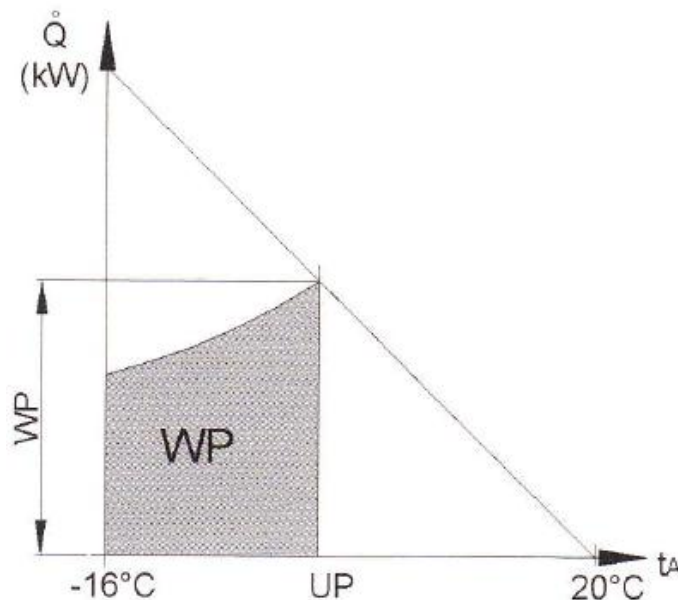


Abbildung 20: Bivalent-paralleler Betrieb (entnommen aus [2] S. 42)

Bivalent-paralleler Betrieb kommt vorwiegend bei Neubauten mit WQ Luft oder Altbausanierungen zum Einsatz und ist für VLT von ca. 65°C geeignet [2] S. 41.

- Bivalent-alternativ

Wie auch bei der bivalent-parallel Betriebsweise sind auch hier zwei verschiedene Wärmeerzeuger vorhanden – mit dem Unterschied, dass diese aber nie gleichzeitig in Betrieb sind. Bivalent-alternativer Betrieb kommt zumeist bei Nachrüstungen zum Einsatz und ist für VLT bis 90°C geeignet. In Neubauten wird diese Betriebsweise nicht eingesetzt und ist daher für diese Arbeit unbedeutend.

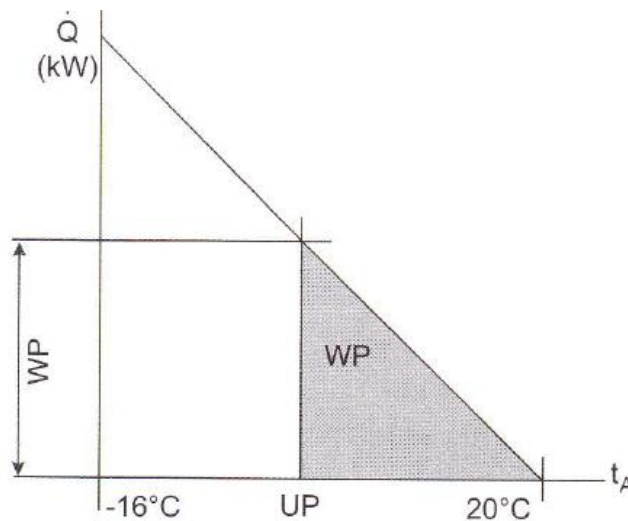


Abbildung 21: Bivalent-alternativ Betrieb (entnommen aus [2] S. 42)

Wie in *Abbildung 21* ersichtlich heizt die *WP* bis zu einer bestimmten Außentemperatur t_A alleine, ab dem sogenannten *UP* ist der Kessel alleiniger Wärmeerzeuger zur Deckung des Wärmebedarfs [2] S. 42.

- Monoenergetisch

Diese Betriebsweise entspricht vom Verhalten her der bivalent-parallel Betriebsweise (vgl. *Abbildung 20*). Bei tiefen Außentemperaturen t_A unterstützt ein E-Heizstab die *WP* zur Deckung des erforderlichen Wärmebedarfs [2] S. 41.

5.4 Bestandteile der Wärmenutzungsanlage WNA – Hydraulik

Die *WNA* setzt sich aus folgenden Teilen zusammen: Pufferspeicher oder Wasserweiche, Primärpumpe (z.B. Umwälzpumpe), Sekundärpumpe, Rohrsystem und Anschluss-Gruppe, Wärmeabgabesystem, ev. *WWB*. Nachfolgend erfolgt eine nähere Beschreibung über die relevanten Komponenten der *WNA*, die für diese Arbeit benötigt werden. Die Dimensionierung der Primär- und Sekundärpumpen werden in dieser Arbeit nicht behandelt [2] S. 81.

5.4.1 Wärmeabgabesystem

Darunter versteht man die für die eigentlichen Heizzwecke zuständigen Geräte. Diese sind z.B. *FBH*, Wandheizung, Deckenheizung, Niedertemperatur-Radiatoren, etc. Die drei wesentlichen Anforderungen des Nutzers, nämlich Behaglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Gesundheit, erfordern eine möglichst niedrige Abgabetemperatur. Diese Kriterien werden von der *FBH* oder aber auch von der Wandheizung optimal erfüllt.

- Fußbodenheizung

Vorweg ist zu sagen, dass sich der Einsatz einer *FBH* nur in sehr gut gedämmten Gebäuden rentiert (Baustandard gemäß *EnEV* 2009/2014).

WP in Kombination mit einer *FBH* eignen sich sehr gut und sind auch anzustreben, da es sich hierbei um ein großflächiges Wärmeabgabesystem handelt und dieses in der Regel mit geringen *VLT* (max. 35°C) auskommt. Die *RLT* sollte dabei auf 30°C ausgelegt werden.

FBH erzielen bereits bei einer Raumtemperatur von 20°C das gleiche Behaglichkeitsempfinden wie ein konventionell beheizter Raum bei 22°C. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass Heizkosten eingespart werden können. Die Verlegeart der Heizungsrohre kann in Schnecken- oder Mäanderform erfolgen.

Wandheizungen als Wärmeabgabesysteme haben im Wesentlichen die gleichen Vorteile wie die *FBH* und werden daher in weiterer Folge nicht näher erläutert. Eine Kombination beider Systeme ist möglich [2] S. 85-89.

- Radiatorenheizung

Bei *WP* als Energieversorgung sind grundsätzlich Niedertemperatur-Radiatoren vorzusehen. Die *VLT* ist bei Neubauten auf 55°C zu begrenzen (max. 65°C bei Nachrüstungen), denn je höher die *VLT*, desto niedriger die Arbeitszahl der *WP* und umso mehr Strom benötigt sie. Radiatoren können ebenfalls mit *FBH* kombiniert werden. Heizkörper haben den Nachteil, dass Staubverwirbelungen stattfinden können, was bei den großflächigen Wärmeabgabesystemen (*FBH*, Wandheizung) aufgrund der milden Strahlungswärme nicht der Fall ist [2] S. 89, 90.

5.4.2 Pufferspeicher

Die Aufgabe des Pufferspeichers ist es, die Wärme zu speichern. Gleichzeitig stellt er eine hydraulische Trennung zwischen der *WP* und dem übrigen System dar. Durch seine vielseitigen Vorteile (Lastausgleich, geringere Schalthäufigkeit der *WP*, Überbrückung von Sperrzeiten insbesondere bei Radiatoren-Heizungen), aber auch um den erforderlichen Volumenstrom für die *WP* sicherzustellen, ist der Einsatz eines Pufferspeichers empfehlenswert. Aufgrund der geringeren Schalthäufigkeit, d.h. der längeren Lauf- und Standzeiten, verlängert sich die Lebensdauer der *WP* um ein Vielfaches.

Bei *FBH* kann der Pufferspeicher entfallen, da ausreichend Wärme im Estrich gespeichert wird, um die Sperrzeiten von den örtlichen *EVU*'s zu überbrücken.

Dimensionierung des Pufferspeichers

Als Richtwert für die Auslegung eines Pufferspeichers kann man von 20 – 30 l/kW Heizleistung ausgehen. Dies bedeutet, dass z.B. für eine *WP* mit einer Heizleistung von 10 kW, ein Pufferspeicher von 250 Liter benötigt wird [17] S. 156; [2] S. 83.

5.4.3 Warmwasserbereitung *WWB*

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die *WWB* (Elektroheizstab, Durchlauferhitzer, *WP*, Solaranlage, usw.). Jedes einzelnes System hat seine Vor- und Nachteile, welche zu berücksichtigen sind. Anzumerken ist, dass eine direkte elektrische *WWB* mittels E-Heizstab oder Durchlauferhitzer in der Regel nicht sinnvoll ist, da die laufenden *BK* etwa das Dreifache der *WP* betragen [17] S. 159.

Wenn die *WWB* über die *WP* erfolgen soll, kann man diese auch nach Möglichkeit und/oder aus ökonomischer Sicht von der Heizungs-*WP* trennen und für diese eine eigene, unabhängige Brauchwasser-*WP* vorsehen. Da die Heizungs-*WP* in der Regel für die *WWB* an heißen Sommertagen überdimensioniert ist, können bei getrennten Systemen höhere *COP*-Werte erreicht werden, was wiederum die *BK* reduziert und die Anlageneffizienz steigert. Zusätzlich können mit der Brauchwasser-*WP* zahlreiche Nebennutzen, wie bereits in *Kapitel 3.5* beschrieben, erzielt werden.

Da die *WWB* in dieser Arbeit über die Heizungs-*WP* erfolgen soll, gilt es folgende Punkte bei der Projektierung zu beachten:

- Für das *EFH* mit durchschnittlichem Wasserverbrauch, ist bei der Dimensionierung der Heizungs-*WP* für die *WWB* eine Leistung von ca. 0,25 – 0,35 kW/Person¹¹ einzurechnen
- Warmwasserspeicher von ca. 300 – 400 Liter (3- bis 5-Personen Haushalt)
- Wärmetauscher ist auf ein ΔT von 5 Kelvin und eine *VLT* von 55°C bzw. bei Sanierungen auf 65°C auszulegen
- Ausreichende Dimensionierung des Wärmetauschers¹²

Richtwerte für den Warmwasserverbrauch bei 50°C: Vollbad ca. 96 – 120 Liter, Duschbad ca. 24 – 40 Liter, Händewaschen ca. 1,5 – 4 Liter [2] S. 90-91, S. 113.

¹¹ Im praktischen Teil dieser Arbeit (*Kapitel 6*) wird der Mittelwert von 0,3 kW/Person herangezogen

¹² Richtwert: je kW Heizleistung ist eine Tauscherfläche von ca. 0,4 – 0,7 m² erforderlich (bei Stahlrohr)

5.5 Gebäudetypen

Bevor die eigentliche Auslegung passender WPA für Heizungs- und Warmwasserbereitungs-zwecke stattfinden kann, muss zunächst geklärt werden, wie gut die Dämmeigenschaften des zu betrachtenden Gebäudes sind, denn nur bei Objekten mit sehr guten Dämmwerten lohnt sich der Einsatz einer WP. Ausschlaggebend hierfür ist der Wärmedurchgangskoeffizient, kurz *U-Wert*, von Fenster, Türen, Außenwänden und Decken durch die jeweiligen Bauteile. Generell gilt: je kleiner dieser Wert, desto besser, denn umso weniger Wärme wird durch das Bauteil transferiert [19] S. 16.

Da diese Arbeit ausschließlich die Energieversorgung am Beispiel eines *NEH* bzw. Neubauten gemäß *EnEV* 2009/2014 behandelt, sind anschließend in *Tabelle 4* typische *U-Werte* sowie Dämmstärken verschiedener Bauteile und Gebäudestandards angeführt.

<i>U-Werte</i> [W/m^2K] Dämmstärke ($\lambda = 0,04$)¹³	Dach	Außenwand	Kellerdecke Bodenplatte	Fenster
EnEV 2002	U = 0,30 12 - 14 cm	U = 0,35 8 - 10 cm	U = 0,40 6 - 8 cm	U _w = 1,70 2-fach Wärmeschutzglas
EnEV 2009/2014 (<i>NEH</i>)	U ≤ 0,20 20 - 26 cm	U ≤ 0,28 12 - 18 cm	U ≤ 0,30 8 - 10 cm	U _w ≤ 1,40 mit 2-fach Wärmeschutzglas
Passivhaus (<i>PH</i>)	U ≤ 0,15 30 - 40 cm	U ≤ 0,15 25 - 30 cm	U ≤ 0,15 25 - 35 cm	U _w ≤ 0,80 mit 3-fach Wärmeschutzglas

Tabelle 4: *U-Werte* verschiedener energetischer Gebäudestandards¹⁴

5.5.1 Niedrigenergiehaus *NEH*

Charakteristisch für das *NEH* ist, dass der jährliche *HWB* kleiner als $70 \text{ kWh}/m^2a$ am jeweiligen Standort sein muss, um als solches eingestuft zu werden. Siehe hierzu auch *Abbildung 22*. Ziel ist es, die Wärmeverluste, welche infolge von Transmissionswärmeverlusten und Lüftungsverlusten auftreten, so gering wie möglich zu halten. Dies erfordert folgende Bauprinzipien bzw. Konstruktionsmerkmale:

¹³ Wärmeleitfähigkeit λ : Material Dämmstoff $\lambda = 0,04$ [19] S. 15

¹⁴ Die Tabelle wurde mit den Daten aus [19] S. 145 erstellt

- Kompakte Bauweise und sehr guter Wärmeschutz aller Bauteile
- Vermeidung und Reduzierung von Wärmebrücken
- Luftdichtheit der Außenbauteile
- Kontrollierte, bedarfsgerechte Lüftung
- Ausnutzung der passiven Sonneneinstrahlung
- Flinke Heizungsregelung

Diese Konstruktionsmerkmale gelten für eine Planung auf Grundlage des heutigen Bau-standards nach *EnEV* 2009/2014 [19] S. 145.

5.5.2 Passivhaus *PH*

Per Definition ist das *PH* ein Gebäude, das ohne aktive Heizungsanlage auskommt und somit den erforderlichen Wärmebedarf alleine durch Nachheizen des Frischluftvolumenstroms sicherstellt. Die Grundidee liegt darin, die Wärmeverluste (Transmissionswärmeverluste, Lüftungswärmeverluste) des Gebäudes derart stark zu verringern, dass die maximale Heizlast unter 10 W/m^2 fällt. Dieser Anteil wird großteils durch Sonneneinstrahlung, Personenwärme, Beleuchtung und Haushaltsgeräte sowie durch die Wärmerückgewinnung *WRG* aus der Raumluft gewonnen. Der Bau eines *PH* bedeutet aufgrund der hohen baulichen Anforderungen (sehr gute Dämmung, 3-fach verglaste Fenster, optimal abgestimmte Lüftungsanlage) aber auch einen zusätzlichen Mehrkostenaufwand von etwa 190 €/m^2 , welcher sich jedoch aufgrund der deutlichen Energieeinsparungen bereits in wenigen Jahren wieder amortisiert.

Folgende Kriterien müssen erfüllt werden, um das *PH* als solches einstufen zu können:

- jährlicher *HWB*: max. $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (siehe auch *Abbildung 22*)
- Gesamt-Primärenergieeinsatz für alle Anwendungen im Haushalt (Heizung, *WWB*, Strom) darf $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ nicht überschreiten
- Einhaltung der *U-Wert-Vorgaben* nach *Tabelle 4* bei den entsprechenden Bauteilen
- Die Zulufttemperatur in den Räumen, darf 17°C nicht unterschreiten
- Jeder Wohnraum muss mindestens eine Außenluftöffnung haben
- Gleichmäßige Luft-Durchströmung in allen Räumen [19] S. 158-163

5.6 Heizleistung und Heizwärmebedarf

Um die *WP* anhand des zu betrachtenden Objektes möglichst exakt dimensionieren zu können, ist die Kenntnis über den erforderlichen Wärmebedarf (Heizung + *WWB*) und die damit verbundene Heizleistung des Gebäudes notwendig. Die exakte Ermittlung der Heizleistung erfordert eine Heizlastberechnung nach den entsprechend gültigen Normen:

- A: ÖNORM EN 12831
- D: DIN EN 12831, *EnEV* 2009
- CH: SIA 380-1 (Ausgabe 2001), SIA 384-2, u.a.

In diesen Normen sind die Norm-Außentemperaturen der jeweiligen Standorte definiert. Ebenso berücksichtigen sie zahlreiche gebäudespezifische Gegebenheiten wie z.B. solare Gewinne etc. Für die spätere Anwendung auf das Musterhaus im praktischen Teil dieser Arbeit, erfolgt die Heizlastberechnung mittels der Gebäudeplanungssoftware *PlanCal Nova* 10.1, welche auf die gültige Norm ÖNORM EN 12831 zurückgreift.

Abbildung 22 zeigt den erfahrungsgemäß zu erwartenden *HWB* verschiedener Gebäudestandards. Wie bereits in *Kapitel 5.5.1* erwähnt, liegt der spezifische jährliche *HWB* eines *NEH* bzw. eines Neubaus gemäß *EnEV* 2014 zwischen 30-70 kWh/m^2a . Im Vergleich dazu beträgt er beim Passivhaus 15 kWh/m^2a [2] S. 39-40. Dieser Energieverbrauch bezieht sich ausschließlich aufs Heizen, d.h. *WW* und Haushaltsstrom fließen hier nicht mit ein.

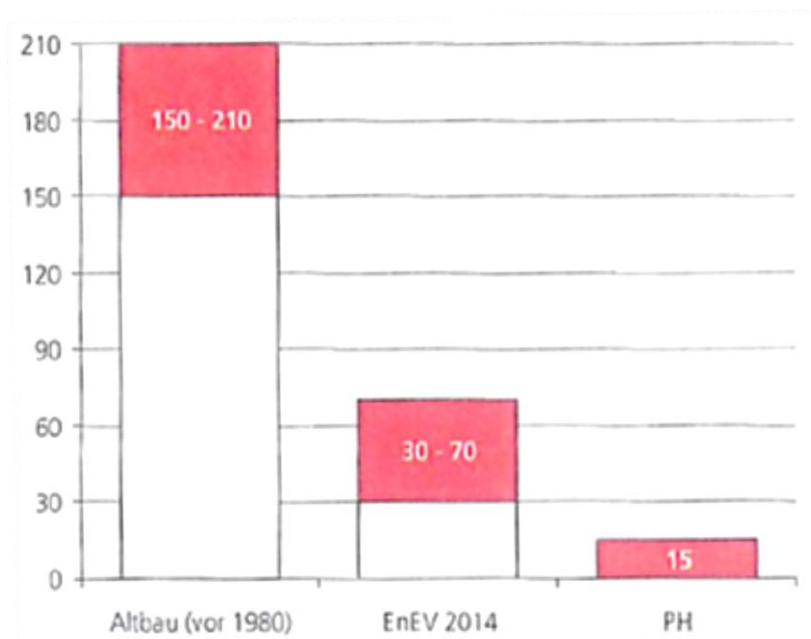


Abbildung 22: Jahres-*HWB* verschiedener Gebäudestandards (entnommen aus [19] S. 137)

5.6.1 Ermittlung der Jahres-Heizarbeit

Für die Ermittlung der Jahres-Heizarbeit ist der Jahres-*HWB* nach *Abbildung 22* mit der zu beheizenden Netto-Wohnfläche (ohne Wände) zu multiplizieren. Siehe hierzu *Formel 5.3*. Sie gibt an, wie viel Heizenergie im Laufe eines Jahres aufzubringen ist [2] S. 40.

$$Q_{Heiz} \left[\frac{kWh}{a} \right] = \text{jährlicher HWB} \left[\frac{kWh}{m^2 a} \right] * A_{Gebäude} [m^2] \quad (5.3)$$

Beispiel:

zu beheizende Wohnfläche: 160 m²

jährlicher *HWB*: 50 kWh/m²a (gemäß Energieausweis)

Betriebsstunden pro Jahr: 1800 h/a

$$Q_{Heiz} = 50 \left[\frac{kWh}{m^2 a} \right] * 160 [m^2] = 8000 \left[\frac{kWh}{a} \right] \quad (5.4)$$

5.6.2 Ermittlung der Heizleistung

Um nun die *WP* dimensionieren zu können, ist die Kenntnis über die Heizleistung des jeweiligen Gebäudes erforderlich. Sie wird nach *Formel 5.6* berechnet. [2] S. 40.

$$P_{Heiz, spezifisch} = \frac{\text{jährliche HWB}}{\text{Betriebsstunden pro Jahr}} = \frac{50000 \left[\frac{Wh}{m^2 a} \right]}{1800 \left[\frac{h}{a} \right]} \approx 28 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.5)$$

$$P_{Heiz} = P_{Heiz, spezifisch} * A_{Gebäude} = 28 \left[\frac{W}{m^2} \right] * 160 [m^2] \approx 4,5 [kW] \quad (5.6)$$

Q_{Heiz} = Jahres-Heizarbeit in kWh/a

P_{Heiz} = Heizleistung des Gebäudes in kW

$A_{Gebäude}$ = Gebäudefläche in m²

Wenn nun die Heizleistung des Gebäudes feststeht, kann anhand von Datenblättern verschiedener *WP*-Hersteller eine passende *WP* gewählt werden. Im praktischen Teil soll die Heizungs-*WP* auch zur Erwärmung des Brauchwassers dienen; so ist – wie bereits in *Kapitel 5.4* beschrieben – ein Leistungsbedarf von ca. 0,25-0,35 kW/Person mit einzurechnen.

6 Technische Gebäudeauslegung

Dieses Kapitel dient als Einleitung für den praktischen Teil dieser Diplomarbeit. Im ersten Schritt wird das fiktive Musterhaus für den in *Kapitel 7* durchgeführten ökonomischen Vergleich dimensioniert und spezifiziert. Nachdem die wichtigsten Parameter des Gebäudes (die zu beheizende Wohnfläche, die erforderliche Heizleistung, das Wärmeabgabesystem, usw.) bekannt sind, erfolgt im nächsten Schritt die technische Auslegung und die Auswahl geeigneter *WPS*, die zur Energieversorgung (Heizung und *WW*) in Frage kommen können. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme des Berechnungstools *JAZCalc*. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden folgende Systeme gewählt und anschließend projiziert: die Wasser-Wasser-*WP*, die Sole-Wasser-*WP* und die Luft-Wasser-*WP*.

6.1 Das Musterhaus – Ermittlung der Heizleistung

Aufgabenstellung:

Das nachfolgend räumlich dargestellte Musterhaus mit seinem fiktiven Standort in 3442 Tulln an der Donau, soll nach dem gesetzlichen Baustandard eines Neubaus nach *EnEV* 2009/2014 errichtet werden. Für eine erste überschlägige Ermittlung der erforderlichen Heizleistung soll zunächst – der Einfachheit halber – ein spezifischer *HWB* von $60 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ angenommen werden. Die exakte Heizlastberechnung nach ÖNORM EN 12831 wird im Anschluss in *Kapitel 6.1.3* mit der Gebäudeplanungssoftware *PlanCal Nova* 10.1 durchgeführt (siehe Auszug Heizlastberechnung im Anhang). Für alle weiteren Berechnungs- und Auslegungsschritte dieser Diplomarbeit wird natürlich der exakte Wert aus der Heizlastberechnung (siehe *Tabelle 5*) verwendet. Das komplette Gebäude soll mit einer *FBH* mit einer *VLT* von 35°C und einer *RLT* von 30°C ausgestattet werden.

6.1.1 Räumliche Zusammensetzung des Gebäudes

Das Referenzgebäude besteht aus zwei Geschossen, dem *EG* und dem *OG*. Die Gebäudegrundfläche beträgt $139,44 \text{ m}^2$ und die Raumhöhe des Gebäudes wird mit $2,70 \text{ m}$ festgelegt. Nachfolgend sind die Geometrie und die räumliche Aufteilung der beiden Geschosse dargestellt. Zudem ersichtlich sind detaillierte Flächenangaben bezüglich der einzelnen Räumlichkeiten sowie die entscheidende Information über die Netto-Gebäudeheizfläche.

Summe Erdgeschoss <i>EG</i> :	$A_{\text{ges}} = 117,80 \text{ m}^2$	davon beheizt:	117,80 m ²
• Flur	$A = 20,10 \text{ m}^2$		
• Kochen	$A = 19,20 \text{ m}^2$		
• Wohnen	$A = 25,60 \text{ m}^2$		
• Essen	$A = 19,00 \text{ m}^2$		
• Technik	$A = 8,90 \text{ m}^2$		
• Bad/WC	$A = 7,50 \text{ m}^2$		
• Büro	$A = 17,50 \text{ m}^2$		

Summe Obergeschoss <i>OG</i> :	$A_{\text{ges}} = 118,20 \text{ m}^2$	davon beheizt:	118,20 m ²
• Schlafen	$A = 22,70 \text{ m}^2$		
• Kind I	$A = 18,80 \text{ m}^2$		
• Kind II	$A = 23,10 \text{ m}^2$		
• Schrankraum	$A = 11,20 \text{ m}^2$		
• Gang	$A = 29,20 \text{ m}^2$		
• Bad	$A = 7,50 \text{ m}^2$		
• WC	$A = 5,70 \text{ m}^2$		

Netto-Gebäudeheizfläche gesamt: **$A = 236,00 \text{ m}^2$**

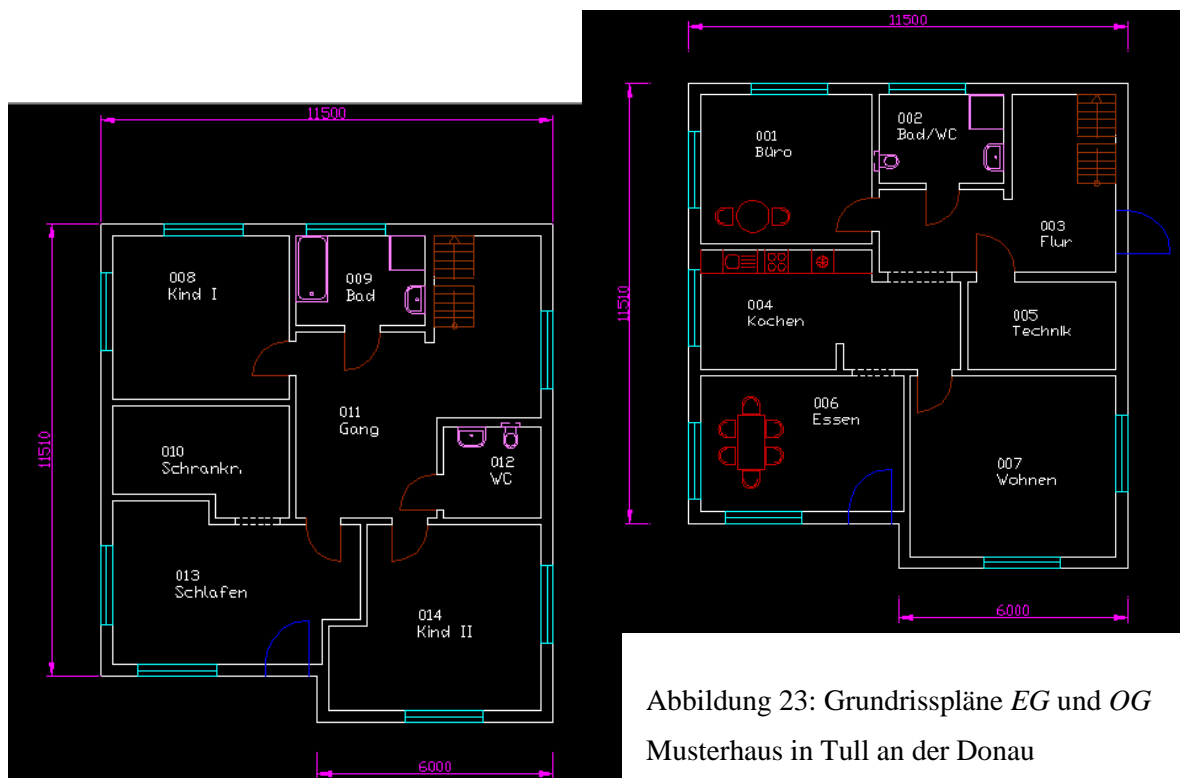


Abbildung 23: Grundrisspläne *EG* und *OG*
Musterhaus in Tull an der Donau

In der oben dargestellten *Abbildung 23* ist die Raumanordnung des fiktiven Musterhauses anhand der beiden Grundrisspläne für das *EG* und das *OG* dargestellt.

Die CAD-Pläne wurden mit AutoCad erstellt und dienen in weiterer Folge zur ausführlichen Heizlastberechnung. Hierzu werden die zweidimensionalen Grundrisspläne in die Gebäudeplanungssoftware *PlanCal Nova* implementiert und das Gebäude anschließend mittels dem Tool „Wandgenerierung“ erzeugt. Die entsprechenden *U*-Werte der jeweiligen Bauteile (Außenwände, Fenster, Türen, usw.) sind gemäß *EnEV* in *PlanCal Nova* automatisch hinterlegt. Folglich kann die Heizlastberechnung in Anwendung auf das fiktive Musterhaus durchgeführt werden. Die respektiven Ergebnisse sind weiter unten in *Tabelle 5* zusammengefasst. Die Zusammensetzung der Heizlastanteile ist auch noch einmal explizit im Anhang (vgl. *Abbildung 37*) ersichtlich.

Bevor nun aber mit der eigentlichen Berechnung der erforderlichen Heizleistung begonnen werden kann, müssen zunächst noch die wichtigsten wärmespezifischen Gebäudedaten und Rahmenbedingungen definiert bzw. zusammengefasst werden.

- Standort: 3442 Tulln an der Donau / NÖ
- Norm-Außentemperatur: -12 °C
- Jahresmittel-Außentemperatur: 8°C
- zu beheizende Gebäudefläche: 236 m²
- spezifischer *HWB* (gültig für die erste Überschlagsrechnung): 60 kWh/m²a
- Betriebszeit: 1800 h/a
- Wärmeabgabesystem: *FHB* für *EG* und *OG* (wo nicht anders möglich, Niedertemperatur-Radiatoren)
- *VLT FBH*: 35°C
- *RLT FBH*: 30°C

6.1.2 Überschlägige Berechnung der erforderlichen Heizleistung

Um die minimal erforderliche Leistung für Heizung und *WWB* überschlägig bestimmen zu können, wird zunächst die Heizleistung der *WP* in Bezug auf das Musterhaus anhand der in *Kapitel 5 (Unterkapitel 5.6.2)* definierten Formeln berechnet.

$$P_{\text{Heiz, spezifisch}} = \frac{60000 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{a}} \right]}{1800 \left[\frac{\text{h}}{\text{a}} \right]} \approx 34 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (6.1)$$

$$P_{Heiz} = 34 \left[\frac{W}{m^2} \right] * 236[m^2] = 8024 [W] \approx 8,03 [kW] \quad (6.2)$$

Da die *WWB* gemeinsam mit der Heizungs-*WP* erfolgen soll, ist ihr anteiliger Leistungsbedarf – wie bereits in *Kapitel 5.4.3* erwähnt – bei der Berechnung zu berücksichtigen. Bei einem 4-Personenhaushalt mit durchschnittlichem *WW*-Bedarf ergibt sich gemäß *Kapitel 5* eine Leistung zu:

$$P_{WW} = 0,30 \left[\frac{kW}{Person} \right] * 4 [Personen] = 1200 [W] = 1,2 [kW] \quad (6.3)$$

Im nächsten Schritt geht es darum, den örtlichen Energieversorger nach dessen Stromtarife und ggf. nach Sperrzeiten zu fragen. Da *EVU-Sperrzeiten* in dieser Arbeit aber nicht berücksichtigt werden, sind diese bei der Leistungsbedarfsberechnung auch nicht miteinzubeziehen. Dadurch kann die erforderliche Gesamtleistung anhand von *Formel 6.4* berechnet werden. Die minimal erforderliche Gesamt-Heizleistung ergibt sich zu:

$$P_{HeizGes} = P_{Heiz} + P_{WW} = 8024 [W] + 1200 [W] = 9224 [W] \approx 9,3 [kW] \quad (6.4)$$

Anhand der obigen Formel ergibt sich nach der ersten überschlägigen Berechnung also eine Gesamtleistung von 9,3 kW – diese ist erforderlich um den Heiz- und *WW*-Bedarf des Musterhauses zu decken. Mit diesem errechneten Richtwert könnten nun passende *WP* aus den jeweiligen Katalogen bzw. Datenblättern der *WP*-Hersteller gewählt werden [17] S.81-82. Für die Projektierung im Anschluss wird jedoch auf den exakten Wert, resultierend aus der anschließenden Heizlastberechnung nach ÖNORM EN12831, zurückgegriffen.

6.1.3 Heizlastberechnung nach ÖNORM EN12831

In diesem Kapitel werden die exakten Ergebnisse der Heizlastberechnung nach ÖNORM EN12831 mittels *PlanCal Nova 10.1* ermittelt. Diese Norm beinhaltet neben der standortbezogenen Norm-Außentemperatur auch noch zusätzliche Faktoren wie z.B. solare Gewinne, interne Wärmegewinne, etc. Als Berechnungsgrundlage wird eine generelle Rauminnentemperatur von 20°C zugrunde gelegt. Die wichtigsten Ergebnisse aus der Berechnung werden in der nachfolgenden *Tabelle 5* zusammengefasst und anschließend in *Kapitel 6.2* bis *Kapitel 6.4* zur Projektierung der verschiedenen *WPS* verwendet.

spezifische Heizlast (aus PlanCal)	36,3 [W/m^2]
Norm-Gebäudeheizlast (aus PlanCal)	8,56 [kW]
Leistungsbedarf <i>WW</i> (Formel 6.3)	1,2 [kW]
Leistungsbedarf gesamt	9,76 [kW]
spezifischer <i>HWB</i> pro Jahr	65,3 [kWh/m^2a]
spezifischer <i>WWB</i> pro Jahr	9,2 [kWh/m^2a]
Jahres-Heizarbeit (ohne <i>WWB</i>)	15410 [kWh/a]
Jahreswärmebedarf <i>WWB</i>	2160 [kWh/a]
Jahreswärmebedarf Gebäude	17570 [kWh/a]

Tabelle 5: Zusammenfassung wichtiger gebäudespezifischer Daten

Die aufzubringende Norm-Gebäudeheizlast setzt sich aus den Transmissionswärmeverlusten nach außen und den Lüftungsverlusten (Mindestluftwechsel) zusammen. Auszüge dieser gebäudespezifischen Werte können am Ende dieser Arbeit im Anhang nachgeschlagen werden. Wie schon zuvor erwähnt, zeigt *Abbildung 37* die quantitativen Verluste über die jeweiligen Bauteile des Gebäudes. Auf die Ermittlung des spezifischen *HWB* und der Jahres-Heizarbeit gemäß *Tabelle 5* wird hier nicht mehr im Detail eingegangen – dies kann bei Bedarf in *Kapitel 5* nachgelesen werden.

Vorweg ist zu sagen, dass für die Projektierung der *WPA* und im weiteren Sinne für die wirtschaftliche Bewertung in *Kapitel 7* keine Puffer- bzw. Trennspeicher berücksichtigt werden, da laut [2] S. 83 genügend Wärmemenge im Estrich der *FBH* gespeichert wird, um bspw. die Sperrzeiten der örtlichen *EVU* zu überbrücken. Auch aus ökonomischer Sicht würde ihr Einsatz zu deutlich geringeren *JAZ* führen. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, sei hier noch einmal erwähnt, dass sowohl die Dimensionierung der Primärpumpe (z.B. Unterwasserpumpe bei Wasser-Wasser-*WP*, Sole-Umwälzpumpe bei Sole-Wasser-*WP*), als auch die Dimensionierung der Sekundärpumpe (z.B. Speicherladepumpe) nicht behandelt wird. Bei Bedarf können diese Schritte in [17] S.139 – 155 nachgelesen werden. Das für die Projektierung verwendete Programm *JAZCalc* und dessen Handhabung werden im Anhang in Kurzform erklärt. Die anschließenden Projektierungsschritte werden in Anlehnung an die Fachliteratur von [17] durchgeführt.

6.2 Projektierung der Wasser-Wasser-Wärmepumpe

Die Tatsache, dass mittels Wasser-Wasser-WP – wie auch aus zahlreichen Fachliteraturen und anhand diverser Expertengespräche hervorgeht – zweifellos die besten Wirkungsgrade und die damit verbundenen höchsten Leistungszahlen (*JAZ*) im Vergleich zu allen anderen Systemen erreicht werden können, muss an dieser Stelle nicht mehr explizit erwähnt werden. Für die Projektierung der Wasser-Wasser-WP wird Folgendes zugrunde gelegt: Eine örtliche Wasseranalyse hat ergeben, dass die Qualität des Wassers innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte¹⁵ liegt und auch alle weiteren umliegenden Rahmenbedingungen zur Erschließung der *WQ* Grundwasser als erfüllt zu betrachten sind. Somit sind alle Gegebenheiten vorhanden, um die *WPA* entsprechend auslegen zu können.

In den nachfolgenden Schritten werden die wichtigsten Parameter zur technischen Auslegung aufgelistet und dabei fünf Wärmepumpentypen namhafter Herstellerfirmen leistungsspezifisch miteinander verglichen. Für die weiteren Auslegungs- bzw. Berechnungsschritte und im weiteren Sinne für die wirtschaftlichen Betrachtung wird hier und auch in den folgenden Kapiteln von dem Mittelwert der *JAZ* ausgegangen.

1. Wärmequelle: Grundwasser (Quellentemperatur 10°C)
2. Einsatz: Heizung & WW
3. Betriebsweise: monovalent
4. Betriebspunkt (vgl. *Kapitel 4.5*): *COP* W10/W35¹⁶
5. Wärmeabgabesystem: *FBH* (*VLT* 35°C, *RLT* 30°C)
6. Antriebsleistung P_F :
 - Carnot'sche Leistungszahl (siehe *Kapitel 4.3.1*) $\epsilon_c = \frac{308\text{ K}}{308\text{ K} - 283\text{ K}} \approx 12,3$
 - Leistungszahl $\epsilon = 0,5 * \epsilon_c = 0,5 * 12,3 \approx 6,2$
 - oder
 - grafische Ermittlung von ϵ anhand von *Abbildung 11* (*Kapitel 4.2.2*)

¹⁵ Eisengehalt Fe < 0,2 mg/l, Mangangehalt Mn < 0,05 mg/l [17] S. 90

¹⁶ *COP* gemäß Normbezug nach DIN EN 14511-2

- die elektrische Antriebsleistung ergibt sich durch Umstellen von *Gleichung 4.1*

aus *Kapitel 4.2.1*: $P_F = \frac{P_H}{\varepsilon} = \frac{9,76}{6,2} \approx 1,8 \text{ [kW]}^{17}$

7. Auswahl geeigneter WPS und Berechnung Ihrer JAZ mittels JAZCalc V8

Wasser-Wasser-Wärmepumpen, Betriebspunkt: W10/W35					
Nr.	Hersteller	Typ	Heizleistung [kW]	JAZ _{Heizen} (gem. JAZcalc)	JAZ _{Gesamt} (Heizung + WW) (gem. JAZcalc)
1	Alpha Innotec	WWC 100 HX	11,00	5,15	4,70
2	Elco Austria GmbH	Aquatop T 08C	10,70	5,31	4,87
3	Vaillant Austria GmbH	geoTHERM VWW 81/3	10,90	5,15	4,77
4	Viesmann Werke GmbH & Co.Kg	WWC 201.A08	9,90	5,00	4,56
5	Hoval Gesm.b.H	Thermalia (8)	11,40	5,26	4,86

Tabelle 6: JAZ Wasser-Wasser-Wärmepumpen verschiedener Hersteller¹⁸

Vergleicht man nun die Ergebnisse aus *Tabelle 6*, z.B. Position drei mit den Herstellerangaben¹⁹ aus [22] S. 42, so erkennt man, dass mit dem Berechnungstool *JAZCalc* sehr präzise Zielwerte für die *JAZ* erreicht werden.

Für die weiteren Berechnungsschritte und die ökonomische Gegenüberstellung wird der Mittelwert der *JAZ* aus *Tabelle 6*, $\beta = 4,75$ (für Heizung + WW) gewählt.

8. Berechnung Jahresenergieverbrauch Q_F durch Umformen von *Formel 4.2* aus *Kapitel 4.2.2*

- Q_H = Heizwärmearbeit (Nutzarbeit) entspricht dem Jahreswärmebedarf des Gebäudes (Heizung + WW). Dieser Wert ist in *Tabelle 5* wiederzufinden.

¹⁷ Gültig bei einer Temperaturdifferenz $\Delta T = 25 \text{ K}$ (für die WWB ist eine höhere Antriebsleistung erforderlich)

¹⁸ Die Tabelle wurde mit Hilfe von firmenspezifischen Datenblättern sowie unter Verwendung des Online-Berechnungstools *JAZCalc V8* [21] erstellt

¹⁹ Hersteller Vaillant: *JAZ* laut Norm VDI 4650 für Heizung = 5,17

- Q_F = eingesetzte Antriebsenergie entspricht dem Jahresenergieverbrauch aller elektrischen Komponenten der WPA
- $Q_F = \frac{Q_H}{\beta} = \frac{17570}{4,75} \approx 3699 \text{ [kWh/a]}$

Der Jahresenergieverbrauch Q_F multipliziert mit dem Strompreis für WP ergibt die jährlichen Betriebskosten BK. Ihre Ermittlung wird in Kapitel 7 noch einmal anschaulich dargestellt.

6.2.1 Hydraulikschema der Wasser-Wasser-WP

Die zuvor dimensionierte WPA kann nun entsprechend *Abbildung 24* schematisch dargestellt und aufgebaut werden. Im Anlagenschema sind die wichtigsten Komponenten der Heizanlage – bestehend aus der WQA, der WP und der WNA (vgl. *Kapitel 5*) – enthalten. Die Wichtigkeit eines guten hydraulischen Abgleichs ist von besonderer Bedeutung, um entsprechend hohe Arbeitszahlen zu erhalten [17] S. 139. Weiterführende technische Informationen können in *Kapitel 5* nachgelesen werden.

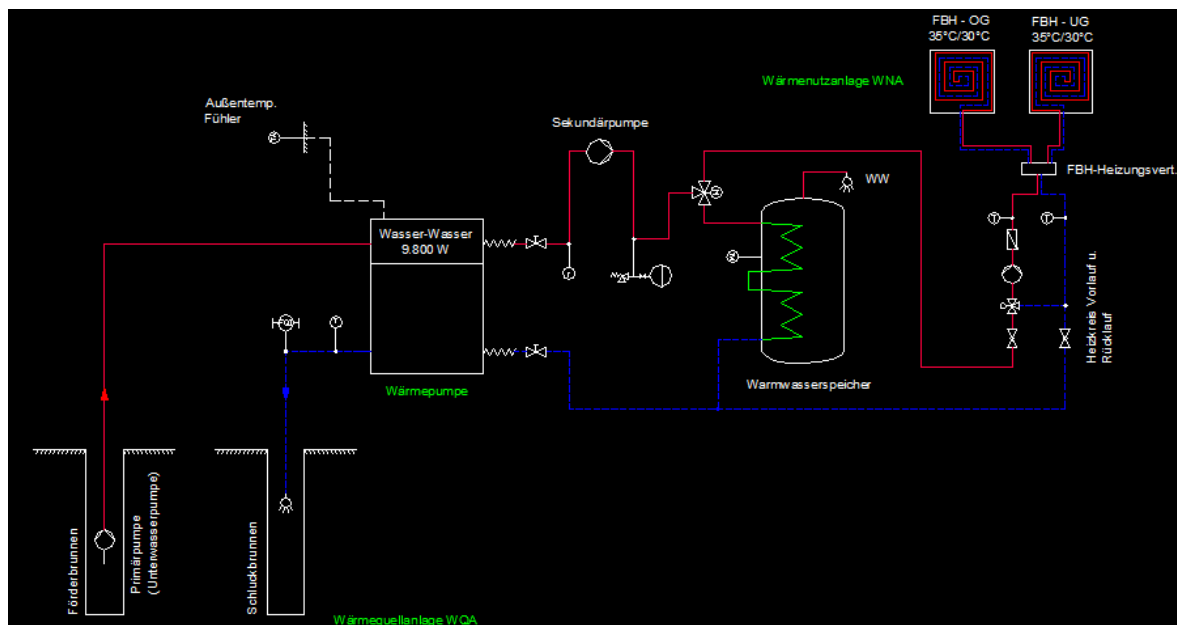


Abbildung 24: Anlagenschema einer Wasser-Wasser-WP mit Warmwasserspeicher²⁰

²⁰ Das Hydraulikschema wurde mittels AutoCad unter Anlehnung an [17] S. 95 erstellt. Dieses Schema soll dazu dienen, einen Überblick über den prinzipiellen Aufbau und die wichtigsten Bestandteile der WPA zu erhalten. Auf Richtigkeit und Vollständigkeit ist vor Ausführung zu prüfen.

6.3 Projektierung der Sole-Wasser-Wärmepumpe

Die Erschließung der WQ Erdreich kann entweder über oberflächennahe Erdwärme mittels Erdkollektoren oder über Tiefenbohrungen mittels Erdsonden erfolgen. Ausgangsbasis für die Auslegung von Flächenkollektor und/oder Tiefensonde ist die Kälteleistung P_K [17] S.96, deren Berechnung im Anschluss durchgeführt wird. Vorweg ist zu sagen, dass für beide Systemtypen der Betriebspunkt B0/W35 Gültigkeit hat und somit in diesem Fall die Ermittlung der JAZ verallgemeinert werden kann.

Wie auch bereits im vorherigen *Kapitel 6.2* erwähnt, werden auch hier die wichtigsten Punkte zur Dimensionierung aufgelistet und jeweils fünf gängige Wärmepumpentypen analysiert und deren JAZ ermittelt.

1. Wärmequelle: Erdreich (Quellentemperatur 0°C)
2. Einsatz: Heizung & WW
3. Betriebsweise: monovalent
4. Betriebspunkt (vgl. *Kapitel 4.5*): COP B0/W35²¹
5. Wärmeabgabesystem: *FBH* (VLT 35°C , RLT 30°C)
6. Antriebsleistung P_F :

- Carnot'sche Leistungszahl (siehe *Kapitel 4.3.1*) $\epsilon_c = \frac{308\text{ K}}{308\text{ K} - 273\text{ K}} \approx 8,8$

- Leistungszahl $\epsilon = 0,5 * \epsilon_c = 0,5 * 8,8 \approx 4,4$

oder

- grafische Ermittlung von ϵ anhand von *Abbildung 11* (*Kapitel 4.2.2*)

- die elektrische Antriebsleistung ergibt sich durch Umstellen von *Gleichung 4.1*

aus *Kapitel 4.2.1*: $P_F = \frac{P_H}{\epsilon} = \frac{9,76}{4,4} \approx 2,2 \text{ [kW]}$ ²²

7. Kälteleistung P_K [17] S. 96:

- $P_K = P_{HeizGes} - P_F = 9,76 - 2,2 \approx 7,6 \text{ [kW]}$

²¹ COP gemäß Normbezug nach DIN EN 14511-2

²² Gültig bei einer Temperaturdifferenz $\Delta T = 35\text{ K}$ (für die *WWB* ist eine höhere Antriebsleistung erforderlich)

8. Auswahl geeigneter WPS und Berechnung Ihrer JAZ mittels JAZCalc V8

Sole-Wasser-Wärmepumpen, Flächenkollektor, Betriebspunkt: B0/W35					
Nr.	Hersteller	Typ	Heizleistung [kW]	JAZ _{Heizen} (gem. JAZcalc)	JAZ _{Gesamt} (Heizung + WW) (gem. JAZcalc)
1	Ochsner Wärmepumpen	GMSW 10 plus S	10,60	4,65	4,23
2	Wolf Klima- und Heiztechnik GmbH	BWS-1-10	10,90	4,67	4,28
3	Vaillant Austria GmbH	geoTHERM VWS 101/3	10,90	4,97	4,55
4	Viesmann Werke GmbH & Co.Kg	BWC 301.B10	10,40	4,91	4,51
5	Hoval Gesm.b.H	Thermalia (10)	10,60	4,55	4,19

Tabelle 7: Sole-Wasser-Wärmepumpen verschiedener Hersteller²³

Wie aus dem Vergleich zu *Tabelle 6* und auch aus den umfangreichen Erläuterungen im theoretischen Teil hervorgeht, werden mit Sole-Wasser-WP aufgrund der niedrigeren Quelltemperatur von etwa 0°C geringere JAZ als mit Wasser-Wasser-WP erreicht. Auch in diesem Fall stimmen die Auslegungswerte von *JAZCalc* sehr genau mit den Daten aus [22] S. 40 überein. Für die weitere wirtschaftliche Betrachtung in *Kapitel 7* wird von dem Mittelwert der JAZ $\beta = 4,35$ (für Heizung + WW) aus *Tabelle 7* ausgegangen.

9. Berechnung Jahresenergieverbrauch Q_F durch Umformen von *Formel 4.2* aus *Kapitel 4.2.2*

- Q_H = Heizwärmearbeit (Nutzarbeit) entspricht dem Jahreswärmebedarf des Gebäudes (Heizung + WW). Dieser Wert ist in *Tabelle 5* wiederzufinden.
- Q_F = eingesetzte Antriebsenergie entspricht dem Jahresenergieverbrauch aller elektrischen Komponenten der WPA

²³ Die Tabelle wurde mit Hilfe von firmenspezifischen Datenblättern sowie unter Verwendung des Online-Berechnungstools *JAZCalc* V8 [21] erstellt. Die Auslegung basiert unter Verwendung von Standard Erdkollektor-Wärmepumpen im oben erwähnten Betriebspunkt. Da das System mit Erdsonden im selbigen Betriebspunkt (B0/W35) idente JAZ liefern würde, wird diese Form der Energiegewinnung hier nicht mehr näher tabelliert.

$$- Q_F = \frac{Q_H}{\beta} = \frac{17570}{4,35} \approx 4039 [kWh/a]$$

Der Jahresenergieverbrauch Q_F multipliziert mit dem Strompreis für WP ergibt die jährlichen BK , dessen Ermittlung in *Kapitel 7* noch einmal anschaulich dargestellt wird.

6.3.1 Hydraulikschema der Sole-Wasser-WP

Abbildung 25 zeigt den schematischen Aufbau einer Sole-Wasser-WP. Im Anlagenschema sind die wichtigsten Komponenten der Heizanlage – bestehend aus der WQA (hier im Beispiel über Erdsonden), der WP und der WNA – enthalten. Weiterführende technische Informationen hierzu können in *Kapitel 5* nachgelesen werden.

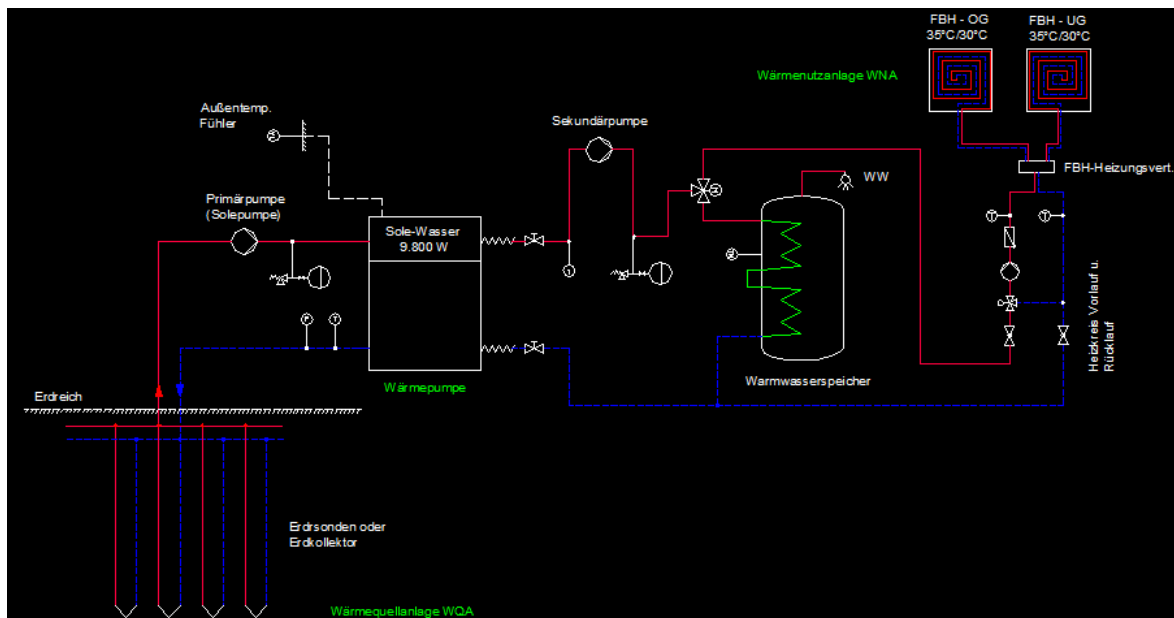


Abbildung 25: Anlagenschema Sole-Wasser-WP mit Warmwasserspeicher²⁴

6.3.2 Auslegung des Erdkollektors

Anhand der zuvor ermittelten Kälteleistung P_K , kann nun der erforderliche Flächenbedarf für den Erdkollektor dimensioniert werden. Es wird an dieser Stelle zugrunde gelegt, dass das umliegende Grundstück ausreichend groß bemessen ist und zugleich alle weiteren Voraussetzungen zur Erschließung der WQ gegeben sind. Um eine Vereisung des Erdreichs

²⁴ Das Hydraulikschema wurde mittels AutoCad unter Anlehnung an [17] S. 105 erstellt. Dieses Schema soll dazu dienen, einen Überblick über den prinzipiellen Aufbau und die wichtigsten Bestandteile der WPA zu erhalten. Auf Richtigkeit und Vollständigkeit ist vor Ausführung zu prüfen.

zu unterbinden, ist dabei auf eine ausreichend große Dimensionierung des Erdkollektors, auf die richtige Verlegetiefe sowie auf den richtigen Verlegeabstand zu achten [17] S. 106, 107. Weiterführende Informationen können in *Kapitel 5.2.2* nachgelesen werden.

10. Bodenbeschaffenheit nach *Tabelle 3*: feuchter Ton, Lehm

- gewählte Entzugsleistung $P_{spez} = 30 \text{ W/m}^2$ bei einer Laufzeit von 1800 h/a

11. Ermittlung der erforderlichen Erdkollektorfläche A_K [17] S. 107 :

$$- A_K = \frac{P_K}{P_{spez}} = \frac{7600}{30} \approx 253 \text{ [m}^2\text{]}$$

Um den gesamten Leistungsbedarf des Gebäudes von 9,76kW decken zu können, wird eine Fläche für den Erdkollektor von $A_K = 255 \text{ m}^2$ gewählt.

12. Ermittlung des max. Verlegeabstandes d_K bei einer Laufzeit von 1800 h/a [17] S.

107 :

- Möglichkeit 1: grafisch mit Hilfe des Diagramms nach *Abbildung 26*

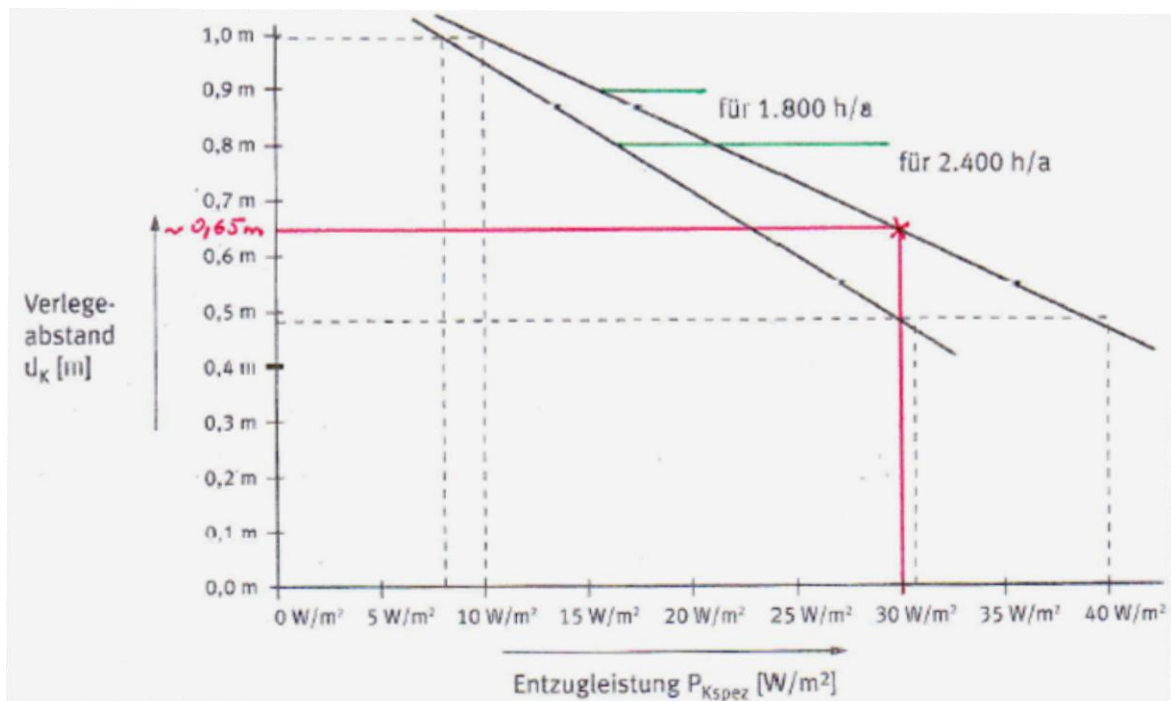


Abbildung 26: Grafische Bestimmung des Verlegeabstandes (entnommen aus [17] S.107)

- Möglichkeit 2: rechnerisch mittels nachfolgender Formel in Anlehnung an VDI 4640 [17] S. 107

$$d_{K18} [m] = 1,17 [m] - P_{spez} \left[\frac{W}{m^2} \right] \times 0,017 \left[\frac{m^3}{W} \right]$$

$$d_{K18} = 1,17 [m] - 30 \left[\frac{W}{m^2} \right] \times 0,017 \left[\frac{m^3}{W} \right] = 0,66 [m]$$

Bei einer Entzugsleistung von 30 W/m^2 ergibt sich nach *Abbildung 26* ein maximaler Verlegeabstand von etwa 0,65 Meter, der auch mit der rechnerischen Lösungsvariante sehr gut übereinstimmt. Weiters zeigt das Diagramm, dass der Verlegeabstand d_k mit zunehmender spezifischer Entzugsleistung linear abnimmt. Im Zweifelsfall kann es nicht schaden, die Kollektorfläche etwas größer und den Verlegeabstand etwas kleiner zu wählen, um dadurch die oben erwähnten Probleme zu vermeiden.

6.3.3 Auslegung der Erdsonden

Anhand der zuvor ermittelten Kälteleistung P_K kann nun die erforderliche Gesamtlänge der Erdsonden dimensioniert werden. Auch hier gilt es darauf zu achten, dass die Erdsonden ausreichend und nicht zu knapp dimensioniert werden, um eine zu starke Auskühlung des Erdreichs und folglich eine Vereisung zu vermeiden. Die Konsequenz daraus ist, dass die WP auf Niederdruckstörung geht und die Anlage dadurch abschaltet und somit nicht mehr zur Verfügung steht [17] S. 106, 107. Weiterführende Informationen können in *Kapitel 5.2.2* nachgelesen werden.

13. Bodenbeschaffenheit nach *Tabelle 2*: wasserführender Sand, Kies

- gewählte Entzugsleistung $P_{spez} = 65 \text{ W/m}^2$ bei einer Laufzeit von 1800 h/a

14. Ermittlung der erforderlichen Sondenlänge L [17] S. 98 :

$$- L = \frac{P_K}{P_{spez}} = \frac{7600}{65} \approx 117 [m]$$

Im Projektierungsbeispiel dieser Arbeit ist davon auszugehen, dass die Erdsonden in wasserführendem Sand/Kies eingebracht werden – die spezifische Entzugsleistung ist somit bekannt. Es ergibt sich eine erforderliche Gesamtlänge von 120 m. In der Praxis würde es sich daher anbieten, zwei Erdsonden mit einer Tiefe von jeweils 60 m zu bohren.

6.4 Projektierung der Luft-Wasser-Wärmepumpe

Die Erschließung der *WQ* Luft hat zwei wesentliche Vorteile:

- sie ist quasi überall und unbegrenzt vorhanden
- sie ist einfach und kostengünstig zu erschließen (keine aufwendigen Bohrungen für Brunnen bzw. Erdsonden erforderlich, keine besonderen Bewilligungen nötig)

Nachteilig ist jedoch, dass, wenn der Einsatz der *WP* am meisten gefragt ist – nämlich an sehr kalten Wintertagen – die Leistung bei fallender Außentemperatur linear abnimmt. In umgekehrter Weise steigt die Leistung der *WP* bei zunehmender Außentemperatur linear an. Dieser Sachverhalt ist auch in *Abbildung 27* ersichtlich. Die Projektierung einer Luft-Wasser-*WP* kann nun nach zwei Möglichkeiten erfolgen:

- die *WP* auf die standortbezogene Norm-Außentemperatur auszulegen
oder
- die *WP* bivalent zu betreiben (Bestimmung des Bivalenzpunktes *Kapitel 6.4.1*).

Erstere hat zur Folge, dass die *WP* in den Übergangszeiten zumeist überdimensioniert ist. Aus diesem Grund werden Luft-Wasser-*WP* in den meisten Fällen bivalent betrieben, wobei an sehr kalten Wintertagen, sprich ab einer bestimmten Unterschreitung der Außentemperatur (Bivalenzpunkt) eine Zusatzheizung, i.d.R. ein E-Heizstab, zugeschaltet wird [17] S. 114, 115. In diesem Fall spricht man von einem monoenergetischen Betrieb (siehe *Kapitel 5.3*).

Im Anschluss werden auch hier die wichtigsten Punkte zur Dimensionierung aufgelistet und fünf gängige Wärmepumpentypen analysiert.

1. Wärmequelle: Außenluft (Norm-Außentemperatur -12°C)
2. Einsatz: Heizung & *WW*
3. Betriebsweise: monoenergetisch (E-Heizstab)
4. Betriebspunkt (vgl. *Kapitel 4.5*): *COP* A2/W35 bzw. *COP* A-7/W35

Anders als bisher werden bei Luft-Wasser-*WP* mehrere *COP*'s zu unterschiedlichen Außentemperaturen angegeben. Gemäß DIN EN 14511-2

beziehen sich die Betriebs-Nennbedingungen zum einen auf -7°C und zum anderen auf $+2^{\circ}\text{C}$ [17] S. 52.

5. Wärmeabgabesystem: *FBH (VLT 35°C, RLT 30°C)*
6. Auswahl geeigneter *WPS* und Berechnung Ihrer *JAZ* mittels *JAZCalc V8*

Luft-Wasser-Wärmepumpen, Betriebspunkt: A2/W35 bzw. A-7/W35					
Nr.	Hersteller	Typ	Heizleistung [kW]	JAZ _{Heizen} (gem. JAZcalc)	JAZ _{Gesamt (Heizung + WW)} (gem. JAZcalc)
1	Ochsner Wärmepumpen	GMLW 14 plus	13,20 bzw. 10,60	4,39	4,16
2	Elco Austria GmbH	AEOROTOP G 10	9,20 bzw. 7,70	3,83	3,68
3	Vaillant Austria GmbH	geoTHERM VWL S 141/3 S	13,90 bzw. 11,10	3,91	3,67
4	Viesmann Werke GmbH & Co.Kg	AWHI 351.A10	10,60 bzw. 8,70	3,60	3,49
5	Hoval Gesm.b.H	Belaria compact IR (9)	9,50 bzw. 7,40	4,23	4,01

Tabelle 8: Luft-Wasser-Wärmepumpen verschiedener Hersteller²⁵

Wie auch schon im theoretischen Teil erwähnt und in diversen Fachliteraturen beschrieben, haben Luft-Wasser-WP deutlich geringere *JAZ* im Vergleich zu allen anderen Systemen. Dies wird auch zahlenmäßig durch die oben dargestellte *Tabelle 8* offenbart. Luft-Wasser-WP unterliegen zugleich auch den höchsten jährlichen Temperaturschwankungen, was sich wiederum unterschiedlich stark auf die laufenden *BK* auswirkt.

Für die weitere wirtschaftliche Betrachtung in *Kapitel 7* wird auch hier von dem *JAZ*-Mittelwert $\beta = 3,80$ (Heizung + WW) aus *Tabelle 8* ausgegangen.

7. Berechnung Jahresenergieverbrauch Q_F durch umformen von *Formel 4.2* aus *Kapitel 4.2.2*
 - Q_H = Heizwärmearbeit (Nutzarbeit) entspricht dem Jahreswärmebedarf des Gebäudes (Heizung + WW). Dieser Wert ist in *Tabelle 5* wiederzufinden.

²⁵ Die Tabelle wurde mit Hilfe von firmenspezifischen Datenblättern sowie unter Verwendung des Online-Berechnungstools *JAZCalc V8* [21] erstellt.

- Q_F = eingesetzte Antriebsenergie entspricht dem Jahresenergieverbrauch aller elektrischen Komponenten der WPA
- $Q_F = \frac{Q_H}{\beta} = \frac{17570}{3,80} \approx 4624 \text{ [kWh/a]}$

Die Erfahrung, die aus zahlreichen Expertengesprächen und Fachliteratur gewonnen wurde, wird hier über das Ergebnis des Jahresenergieverbrauchs Q_F bestätigt. Im Vergleich zu den beiden anderen Systemen ist der Wert von Q_F um einiges größer und somit lässt sich bereits hier – auch ohne tiefgründigem technisch-wirtschaftlichen Verständnis – schon abschätzen, dass die jährlichen *BK* einer Luft-Wasser-WP doch um einiges höher sind als bei den anderen Systemen.

6.4.1 Ermittlung des Bivalenzpunktes und des Wärmepumpenanteils

In der nachfolgenden *Abbildung 27* wird die grafische Bestimmung des Bivalenzpunktes zweier verschiedener Wärmepumpenhersteller aus *Tabelle 8* erklärt. Dabei sollen die beiden Typen „GMLW 14 plus – Hersteller Ochsner“ (rote Kennlinie) und „AWHI 351.A10 – Hersteller Viesmann“ (grüne Kennlinie) näher betrachtet werden.

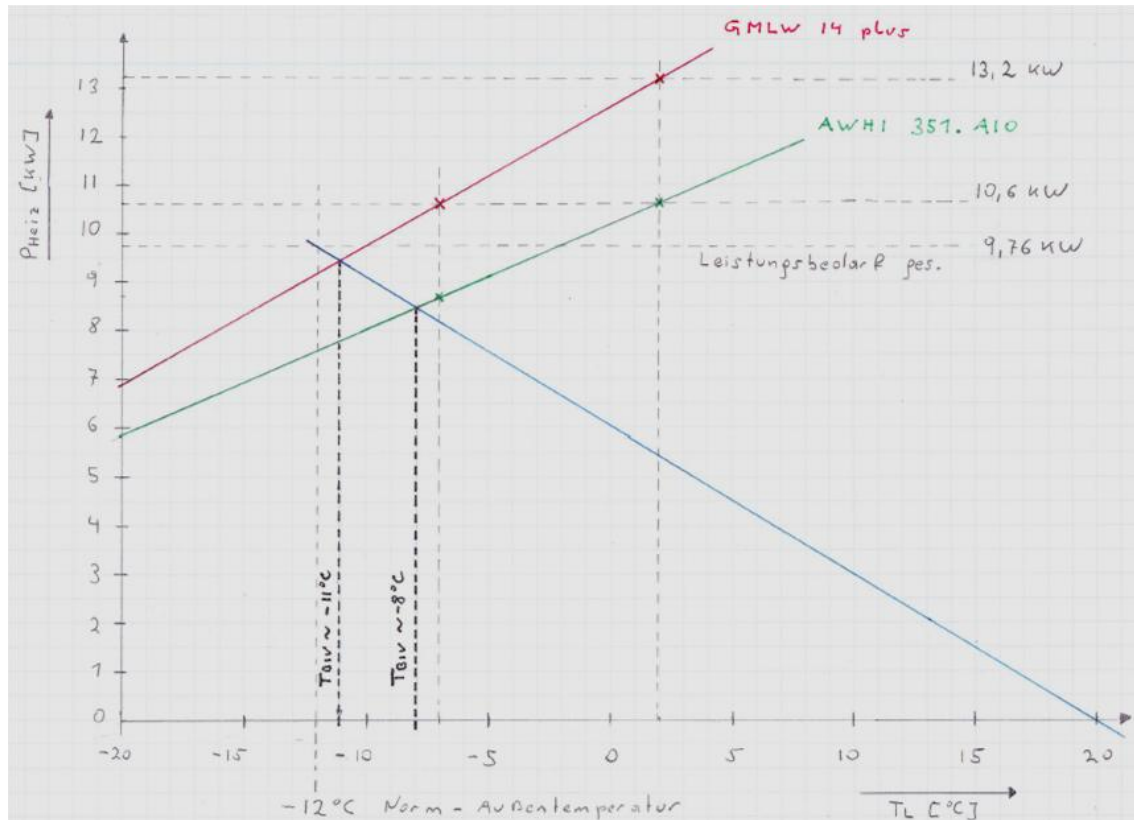


Abbildung 27: Bestimmung des Bivalenzpunktes zweier WP-Typen aus *Tabelle 8*

Bei der zeichnerischen Vorgehensweise sind zunächst die Leistungen der *WP* in den beiden Norm-Betriebspunkten bei 2°C und -7°C in das Diagramm zu übertragen. Anschließend erhält man zwei Schnittpunkte; durch die Verbindung dieser beiden Punkte entsteht eine Gerade, welche die Leistungskennlinie der *WP* (rote und grüne Kennlinie) in Abhängigkeit der *AT* beschreibt. Die blaue Kennlinie stellt den erforderlichen Wärmebedarf des Gebäudes (Heizung und *WW*) bei der standortbezogenen Norm-Außentemperatur dar. Bei einer *AT* von $+20^{\circ}\text{C}$ ist die Heizleistung der *WP* gleich Null. Der Schnittpunkt der blauen Kennlinie mit der Leistungskennlinie der *WP* ergibt den jeweiligen Bivalenzpunkt – also jenen Punkt bei der die Zusatzheizung zugeschaltet wird. In der obigen Grafik ist der jeweilige Bivalenzpunkt über die schwarz strichlierte Linie gekennzeichnet. Natürlich könnte man den Bivalenzpunkt auch mathematisch unter Anwendung der Geradengleichung ermitteln, um aber den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wird auf die rechnerische Vorgehensweise verzichtet, da mit der grafischen Methode ohnehin sehr exakte Aussagen getroffen werden können.

Die Erkenntnis, die aus *Abbildung 27* hervorgeht, ist, dass der Bivalenzpunkt der Ochsner *WP* relativ nahe an der Norm-Außentemperatur (-12°C) liegt. Die Zusatzheizung würde in diesem Fall kaum zum Einsatz kommen, daher sollte dieser Typ aus wirtschaftlichen Gründen monovalent – sprich ohne Zusatzheizung – betrieben werden. Ihr anteiliger Einsatz ist in *Abbildung 28* dargestellt. Hingegen liegt der Bivalenzpunkt der kleineren *WP* von Viessmann bei ca. -8°C , was bedeutet, dass die Zusatzheizung von der Regelung entsprechend eher eingeschaltet wird. Daraus lässt sich schließen, dass bei der Viessmann *WP* auf jeden Fall ein bivalenter Betrieb z.B. mittels E-Heizstab sinnvoll ist, um auch an sehr kalten Tagen die erforderliche Grundheizlast des Gebäudes decken zu können [17] S. 121.

Anhand von *Abbildung 28* können Aussagen über den prozentuellen *WP*-Anteil und somit auch über den anteiligen Einsatz der Zusatzheizung getroffen werden. Die Ochsner *WP* „GMLW 14 plus“ wird wiederum durch die rote Kennlinie beschrieben, wobei ihr Anteil zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs des Gebäudes etwa 99,6% beträgt. Das bedeutet, dass nur etwa 0,4% der Jahresheizarbeit für Heizung und *WW* durch die Zusatzheizung, also den E-Heizstab, aufzubringen sind. Da dieser Anteil verhältnismäßig sehr gering ist, sollte dieser Typ aus energiewirtschaftlichen Gründen monovalent betrieben werden. Die Viessmann *WP* „AWHI 351.A10“ wird durch die grüne Kennlinie dargestellt, wobei hier in etwa 97,8% des jährlichen *HWB* durch ihren Einsatz gedeckt werden. Der restliche Anteil, nämlich etwa 2,2% ist in Kombination mit dem E-Heizstab aufzubringen.

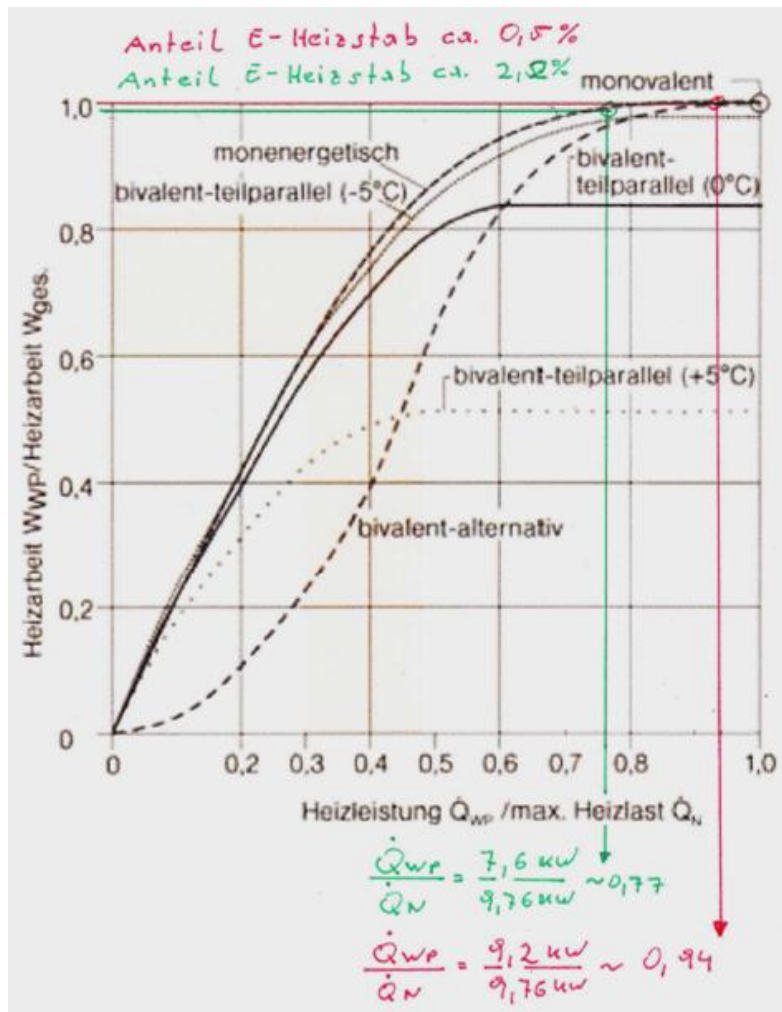


Abbildung 28: Grafische Ermittlung des Wärmepumpenanteils (entnommen aus [17] S. 123)²⁶

\dot{Q}_{WP}/\dot{Q}_N gemäß obiger Grafik, beschreibt das Verhältnis der WP-Leistung bei der Norm-Außentemperatur von -12°C und der Nennleistung der WP für Heizung und WWB.

W_{WP}/W_{ges} gibt Auskunft über den prozentualen Einsatz der Wärmepumpe zur Deckung des jährlichen Wärmebedarfs [17] S. 123. Dabei gilt: je höher dieses Verhältnis, desto mehr Heizarbeit wird von der WP übernommen, desto niedriger sind die Stromkosten für die Zusatzheizung, desto höher sind auch die zu erreichenden JAZ. Anhand von Expertengesprächen geht hervor, dass der max. Anteil der Zusatzheizung keinesfalls größer als 15% sein soll, da sonst davon auszugehen ist, dass die WP sicher nicht mehr ökonomisch arbeitet. Generell gilt aber: die Zusatzheizung sollte so wenig wie möglich und so oft wie nötig im Einsatz sein.

²⁶ Die grafisch ermittelten Werte stimmen mit hinreichender Genauigkeit mit den Berechnungswerten von JAZCalc überein.

Die Schlussfolgerung, die hier gezogen werden kann, ist, dass Position zwei, vier und fünf aus *Tabelle 8* sinnvollerweise bivalent zu betreiben sind, während hingegen bei den beiden anderen Wärmepumpentypen ein monovalenter Einsatz empfehlenswert ist.

8. Berechnung anteiliger Energieverbrauch des E-Heizstabes Q_{EHeiz}

- $Q_{EHeiz} = \text{Stromverbrauch der Zusatzheizung (E-Heizstab)}$
- $Q_{EHeiz} = 9,76 \text{ [kW]} * \frac{2,2[\%]}{100} * 1800 \left[\frac{\text{h}}{\text{a}}\right] \approx 390 \text{ [kWh/a]}^{27}$

Je nach Stromanbieter und *ST* ist in diesem Fall mit einem Mehrkostenaufwand von etwa 70-105 € zu rechnen.

6.4.2 Hydraulikschema der Luft-Wasser-WP

Abbildung 29 zeigt den schematischen Aufbau einer Luft-Wasser-WP. Im Hydraulikschema ist die Ausführungsvariante mit Split-Verdampfer für den Außenbereich und innenliegender WP dargestellt. Wie zuvor erwähnt, wird für die wirtschaftliche Gegenüberstellung auch hier der Einsatz eines Pufferspeichers nicht berücksichtigt. Weiterführende technische Informationen können in *Kapitel 5* nachgelesen werden.

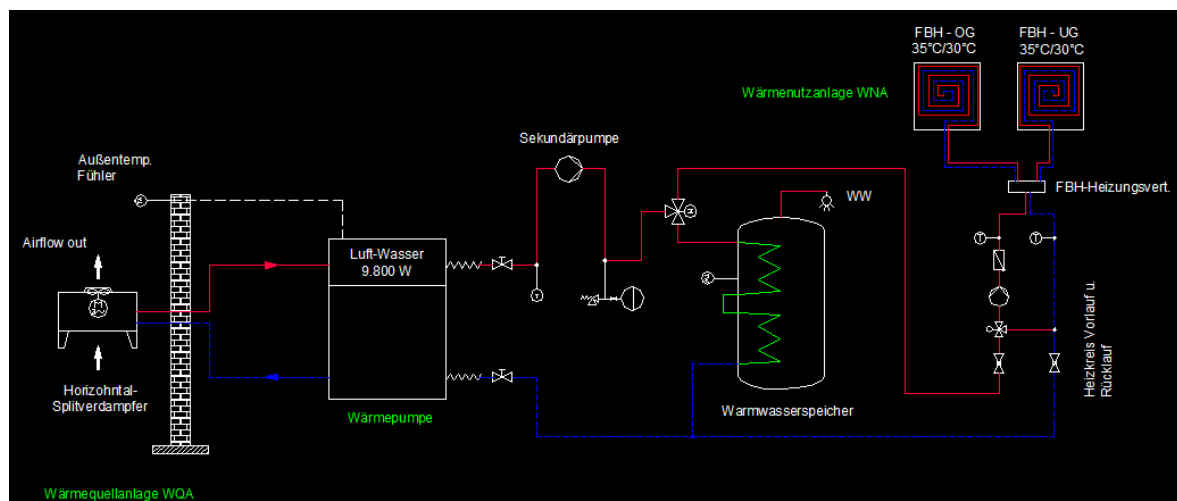


Abbildung 29: Anlagenschema Luft-Wasser-WP mit Warmwasserspeicher²⁸

²⁷ Der Jahresstromverbrauch $Q_{EHeiz} = 390 \text{ [kWh/a]}$ ist für die Viessmann-WP „AWHI 351.A10“ aus *Tabelle 8* bei einer Laufzeit von 1800 [h/a] gültig.

²⁸ Das Hydraulikschema wurde mittels AutoCad unter Anlehnung an [17] S. 95 erstellt. Dieses Schema soll dazu dienen, einen Überblick über den prinzipiellen Aufbau und die wichtigsten Bestandteile der WPA zu erhalten. Auf Richtigkeit und Vollständigkeit ist vor Ausführung zu prüfen.

6.5 Zusammenfassung der wichtigsten Auslegungsdaten

Die nachfolgende *Tabelle 9* zeigt noch einmal die wesentlichen gewonnenen Daten aus der zuvor durchgeführten Projektierung der einzelnen Systeme.

WP-System	Betriebspunkt	\varnothing JAZ_{Gesamt} (Heizung + WW)	Kälteleistung P_K [kW]	Jahresenergieverbrauch Q_F [kWh/a]
Wasser-Wasser-WP	W10/W35	4,75	n. A.	3699
Sole-Wasser-WP (Erdkollektor)	B0/W35	4,35	7,60	4039
Sole-Wasser-WP (Erdsonden)	B0/W35	4,35	7,60	4039
Luft-Wasser-WP	A2/W35 A-7/W35	3,80	n. A.	4624

Tabelle 9: Technische Auslegungsdaten der Energiesysteme

Die zwei wichtigsten Kenngrößen, die im Zuge der Projektierung entstanden sind, sind zum einen die durchschnittliche Gesamtjahreszahl um in weiterer Folge den *JEV* der Anlagen ermitteln zu können, und zum anderen der minimal erforderliche Leistungsbedarf der *WP* gemäß *Tabelle 5*, um die Grundlast des Gebäudes decken zu können. Diese haben maßgeblich Relevanz für die Bestimmung der *IK* und der *BK*, welche im Anschluss für die ökonomische Systembewertung erforderlich sind.

Die Resultate aus der obigen Tabelle ergänzen sich mit den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit. Die Wasser-Wasser-WP erreicht in der Gegenüberstellung die höchsten *JAZ* während hingegen die Luft-Wasser-WP die geringsten *JAZ* zu Buche führt. Somit ist auch eindeutig ersichtlich, dass die Wasser-Wasser-WP den niedrigsten *JEV* mit sich trägt. Die Gründe dafür müssen an dieser Stelle nicht mehr erwähnt werden.

Zum Abschluss dieses Kapitels sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse aus der oben durchgeführten Projektierung ausschließlich Gültigkeit in Bezug auf Neubauten gemäß *EnEV 2009/2014* bzw. *NEH* mit einem spezifischen *HWB* $< 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ haben. Würde es sich beim Musterhaus um einen Altbau oder um ein *PH* handeln, so sind die jeweiligen Energiesysteme entsprechend des erforderlichen *HWB* neu auszulegen und die Ergebnisse würden wesentlich von den in *Tabelle 5* und *Tabelle 9* erzielten Werten abweichen.

7 Ökonomischer Systemvergleich

Das letzte Kapitel dieser Diplomarbeit beschäftigt sich mit der ökonomischen Betrachtung der projektierten *WPS*, die im vorherigen Kapitel im Detail behandelt wurden. Vorweg ist zu sagen, dass die Wirtschaftlichkeit einer *WPA* durch verschiedene Faktoren geprägt ist. So ist z.B. eine Kombination aus sinnvollem Anlagenaufbau, sprich ein guter hydraulischer Abgleich sowie ein lückenloses Regel- und Steuerkonzept unumgänglich, um ein entsprechend wirtschaftlich arbeitendes Gesamtsystem zu erhalten. Insbesondere die Auslegung der *WNA* und der *WQA* aber auch die richtige Auswahl der Primär- und Sekundärpumpe, die Betriebsweise der *WP*, die Entscheidung ob nur geheizt oder auch die *WWB* gemeinsam mit der Heizungswärmepumpe erfolgen soll u.v.m., bestimmen maßgeblich die Höhe der anfallenden Investitions- und Betriebskosten.

Zu Beginn dieses Vergleichs sollen kurz die theoretischen Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung und deren mögliche Verfahren erläutert werden. Im weiteren Verlauf sollen dann anhand des statischen Verfahrens die Systeme über einen festgelegten Zeitraum bewertet und Aussagen über deren Wirtschaftlichkeit getroffen werden.

7.1 Verfahren zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit

Grundsätzlich kann man zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Investition, im konkreten Fall eines Energiesystems oder aber auch einer Energiesparmaßnahme, zwischen zwei Verfahren differenzieren:

- **Statische Verfahren**

Bei den statischen Rechenverfahren handelt es sich um sehr einfache Verfahren, um verschiedene Maßnahmen miteinander zu vergleichen. Sie eignen sich somit optimal um erste Aussagen über die Wirtschaftlichkeit eines Systems zu treffen. Kapitalverzinsung, Energiepreissteigerungen und Inflation werden hier nicht berücksichtigt, wodurch sie für den langfristigen und detaillierten Vergleich ungenau und daher eher unüblich sind [27] S.121, S.122. Die wichtigsten Methoden des statischen Verfahrens sind u.a. die Kostenvergleichsrechnung *KVR*, die Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsrechnung und die statische Amortisationsrech-

nung [26] S. 30. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aber nur auf die wichtigsten Verfahren, die auch später in Anwendung gebracht werden, eingegangen.

- **Dynamische Verfahren**

Die gebräuchlichsten Methoden des dynamischen Verfahrens sind u.a. die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode, die interne Zinsfußmethode und die dynamische Amortisationsrechnung [26] S. 30. Hier werden auch Kapitalverzinsung, Energiepreissteigerung und Inflation innerhalb der *Nutzungsdauer* berücksichtigt, wodurch sie sich für den langfristigen Vergleich einer Investition bzw. einer Energiesparmaßnahme sehr gut eignen. Dynamische Verfahren beruhen oft auf komplizierten mathematischen Formeln und setzen zum Teil tiefgründige betriebswirtschaftliche Kenntnisse voraus [27] S.122. Die Methoden der dynamischen Verfahren werden in dieser Arbeit nicht in Anwendung gebracht.

Um hierzu einen besseren Überblick zu erhalten, ist in der nachfolgenden *Abbildung 30* die Einteilung der Verfahren zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer Investition noch einmal grafisch dargestellt.

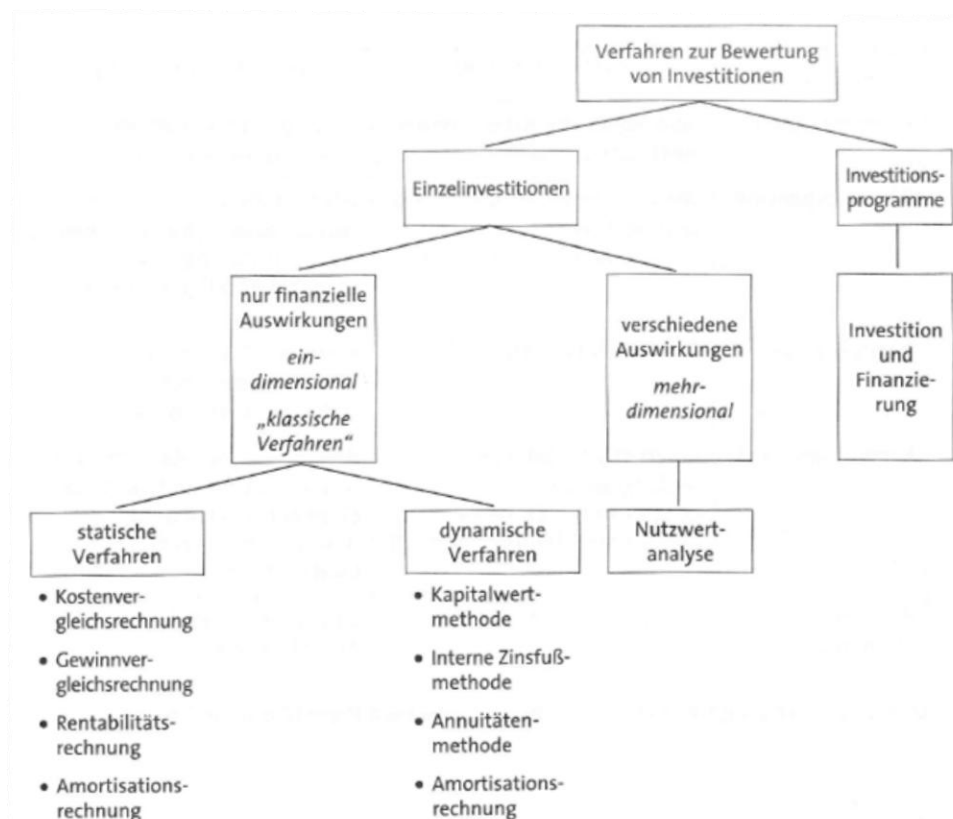


Abbildung 30: Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung (entnommen aus [26] S.30)

Da es sich bei dieser Arbeit um Einzelinvestitionen im Sinne einer Energieversorgungsanlage für das in *Kapitel 6* dimensionierte Musterhaus handelt, ist ausschließlich die linke Spalte, sprich die Unterteilung der „klassischen Verfahren“ relevant. Anhand dieser vielseitigen Methoden und Möglichkeiten, können nun wie oben beschrieben, die jeweiligen Systeme ökonomisch bewertet werden und somit Aussagen über deren Wirtschaftlichkeit getroffen werden.

Um einerseits den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wird für den anschließenden Vergleich ausschließlich auf das statische Verfahren, konkret auf die *KVR* und auf die statische Amortisationsrechnung zurückgegriffen. Zinsentwicklungen, Preissteigerungen und Inflation werden bei diesen beiden Methoden nicht berücksichtigt. Dies ist aber auch nicht notwendig, da die *WPS* ohnehin einheitlich Energie in Form von Strom beziehen und daher keine anderen Energieträger (z.B. Erdöl, Erdgas, Pellets, usw.) in den primären Vergleich mit hineinfließen. Ebenso wird zugrunde gelegt, dass die Investition ohne Aufnahme eines Bankkredites stattfindet.

Zum anderen ist es gemäß dem Hauptziel dieser Arbeit nicht zweckmäßig, die exakten Kosten der einzelnen Anlagen in einem bestimmten Zeitraum zu bestimmen, sondern lediglich Aussagen anhand der anfallenden *GK* (Summe aus *IK* und *BK*) über die Vorteilhaftigkeit in Bezug auf das Musterhaus zu treffen und daraus das wirtschaftlichste System abzuleiten. Hierfür sind die Methoden des statischen Verfahrens sehr gut geeignet und werden daher auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit angewendet.

7.2 Investitionskosten der einzelnen Systeme

Die nachfolgende Ermittlung der Systeminvestitionskosten erfolgt primär durch die Einholung diverser Angebote von Fachfirmen, aber auch sekundär über einschlägige Fachliteratur und anhand von Expertengesprächen mit Fachleuten aus der Branche. Aus den vorliegenden Angeboten potentieller Wärmepumpenlieferanten wurden dann die entsprechenden Mittelwerte der vier zuvor projektierten Heizsysteme errechnet und für die weitere wirtschaftliche Betrachtung zur Verfügung gestellt. Die ermittelten *IK* für die jeweiligen Systeme wurden dann mit einigen tatsächlich verwirklichten Referenzobjekten verglichen und ebenso mit Experten der Branche diskutiert. So ist es im Anschluss möglich, relativ exakte und realitätsbezogene Kosten für die vier *WPS* zu nennen.

7.2.1 Vorgehensweise bei der Angebotseinholung

Da es sich als außerordentlich schwierig erweist, für wissenschaftliche Arbeiten entsprechende Angebote von Fachfirmen einzuholen, wurde im Anfragestatus definiert, dass es sich um ein reales Bauvorhaben mit einem Realisierungszeitraum von etwa 6-9 Monaten handelt. Mit der Scheinidentität als potentieller Kunde, den in *Kapitel 6* ermittelten Berechnungsgrundlagen, den wichtigsten gebäudespezifischen Kennwerten sowie nach einigen Telefonaten mit den Firmenvertretern, war es schlussendlich möglich, zahlreiche Angebote geeigneter Firmen einzuholen. Dabei wurden hauptsächlich Unternehmen mit Schwerpunkt Energie- bzw. Haustechnik Installationen im nahen Umkreis des Bauvorhabens ausgewählt. Es wurden zudem sowohl Angebote von Brunnenbauunternehmen als auch Angebote von Unternehmen mit Schwerpunkt Tiefenbohrtechnik eingeholt, um in weiterer Folge auch möglichst genaue Kosten für die Erschließung der jeweiligen *WQ* präsentieren zu können. Aus den oben genannten Gründen wird die Identität der Firmen im weiteren Verlauf nicht preisgegeben und daher auch deren Angebote anonym gehalten. Nachfolgend ist ein verschlüsselter Auszug der Angebotspreise einiger Unternehmen angeführt:

System Wasser-Wasser-WP:

- Firma WW-1: Raum 3433 NÖ, Gesamtkosten: € 26.470 inkl. *MwSt.*
- Firma WW-2: Raum 1003 WIEN, Gesamtkosten: € 28.820 inkl. *MwSt.*
- Firma WW-3: Raum 3160 NÖ, Gesamtkosten: € 28.510 inkl. *MwSt.*

System Sole-Wasser-WP mit Erdkollektor:

- Firma SW-EK-1: Standort 3902 NÖ, Gesamtkosten: € 26.560 inkl. *MwSt.*
- Firma SW-EK-2: Standort 4601 OÖ, Gesamtkosten: € 25.970 inkl. *MwSt.*
- Firma SW-EK-3: Standort 3500 NÖ, Gesamtkosten: € 23.110 inkl. *MwSt.*

System Sole-Wasser-WP Erdsonde:

- Firma SW-ES-1: Standort 4343 OÖ, Gesamtkosten: € 30.600 inkl. *MwSt.*
- Firma SW-ES-2: Standort 1120 WIEN, Gesamtkosten: € 31.480 inkl. *MwSt.*
- Firma SW-ES-3: Standort 3500 NÖ, Gesamtkosten: € 29.590 inkl. *MwSt.*

System Luft-Wasser-WP (Split-Ausführung):

- Firma LW-1: Standort 4601 OÖ, Gesamtkosten: € 15.390 inkl. *MwSt.*

- Firma LW-2: Standort 3532 NÖ, Gesamtkosten: € 15.950 inkl. *MwSt.*
- Firma LW-3: Standort 4030 OÖ, Gesamtkosten: € 13.600 inkl. *MwSt.*

Die oben angeführten Preise verstehen sich ohne Berücksichtigung der lieferantenspezifischen Produktrabatte. Diese bewegen sich je nach Anbieter typischerweise im Bereich zwischen 15-25 Prozent, was letztendlich doch zu einer relativ großen Kostenreduktion im Entscheidungsfall beitragen kann. Um aber eine möglichst genaue Aussage für die ökonomische Gegenüberstellung treffen zu können, wird im Anschluss von den jeweiligen Listenpreisen der Anbieterfirmen ausgegangen.

7.2.2 Auswertung der Investitionskosten

Die nachfolgende *Tabelle 10* zeigt die *IK* der vier zu bewertenden *WPS* anhand der errechneten Mittelwerte aus den vorliegenden Angebotspreisen. Die so entstandenen Mittelwerte wurden nach den mathematischen Rundungsregeln auf die nächste Zehnerstelle auf- bzw. abgerundet. Die Gesamtinvestitionskosten wurden dabei aus mindestens drei Preisangeboten fachspezifischer Haustechnikfirmen erstellt, sodass in der nachfolgenden Tabelle möglichst exakte und realitätsgetreue Anschaffungskosten ausgegeben werden können.

Positionsbeschreibung	WW-WP	SW-WP (Erdsonden)	SW-WP (Erdkollektor)	LW-WP (Split)
WP mit integriertem WWS ca. 185 L, Pumpengruppen, Installationsmaterial, Regler und Zubehör	12 080 €	11 980 €	11 140 €	12 120 €
Erschließungskosten WQ	6 920 €	9 580 €	5 320 €	-
Montage WP inkl. Verrohrungen, Elektroanschluss inkl. Zähler, IBN durch Werkkundendienst	3 620 €	3 890 €	3 730 €	2 140 €
Investitionskosten ohne <i>MwSt.</i>	22 620 €	25 450 €	20 190 €	14 260 €
Mehrwertsteuer 20%	4 520 €	5 090 €	4 040 €	2 850 €
Investitionskosten inkl. <i>MwSt.</i>	27 150 €	30 540 €	24 230 €	17 110 €

Tabelle 10: Investitionskostenvergleich der einzelnen *WPS*²⁹

²⁹ Sämtliche Preisangaben haben ausschließlich Gültigkeit in Bezug auf Neubauten gemäß *EnEV* mit der zuvor definierten Norm-Gebäudeheizlast mit Angebotsstand 2015. Ebenso handelt es sich bei diesen Angaben um errechnete Durchschnittswerte, die je nach Hersteller und Geräteeffizienz nach oben oder nach unten abweichen können.

Für die wirtschaftliche Bewertung der System-Gesamtkosten, welche in *Kapitel 7.4* durchgeführt wird, wird der Kostenanteil für die *FBH* nicht berücksichtigt. Einige Unternehmen haben hierfür Kosten zwischen 8600 € - 9550 € inkl. *MwSt.* angegeben. Die *IK* setzen sich somit aus dem Energiesystem (Heizung mit integriertem *WWS*) inkl. erforderlichem Zubehör und Pumpengruppen, den Kosten für die Erschließung der jeweiligen *WQ* sowie den Kosten für Elektroanschluss inkl. Zähler, Montage und Inbetriebnahme *IBN*, zusammen. Letztere ist bei fast allen Lieferanten verpflichtend um die Garantieübernahme durch den Werkskundendienst zu erhalten.

Um dem Leser ein besseres Bild zu gewähren, ist die Höhe der anfallenden *IK* der einzelnen Systeme in der nachfolgenden *Abbildung 31* noch einmal grafisch dargestellt.

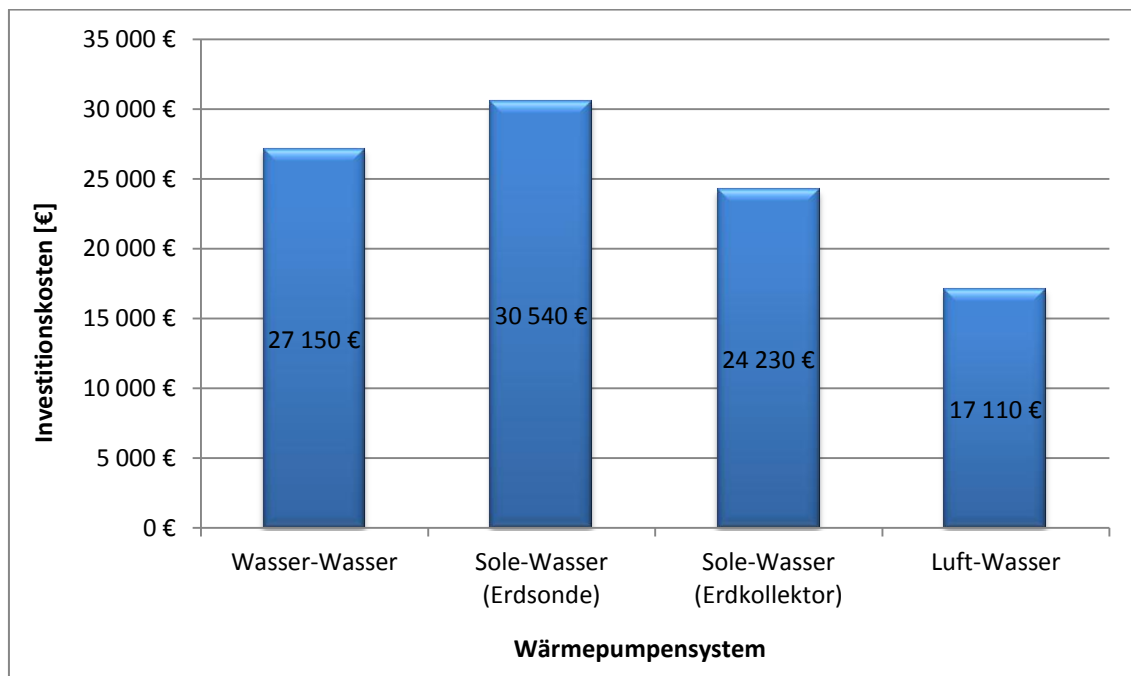


Abbildung 31: Investitionskostenvergleich der einzelnen *WPS* grafisch³⁰

Wie in diesem Balkendiagramm ersichtlich, sind an der horizontalen Achse (Abszisse) die im Vergleich stehenden *WPS* aufgetragen. Die vertikale Achse (Ordinate) stellt die Höhe der anfallenden *IK* in Euro dar.

³⁰ Preisangaben inkl. *MwSt.* und ohne Berücksichtigung von Förderungen, Zuschüssen und Produktrabatten.

7.2.3 Resümee aus den ermittelten Investitionskosten

In *Tabelle 11* sind die *IK* noch einmal übersichtlich und chronologisch geordnet abgebildet – beginnend mit dem günstigsten System. Dabei ist zu erkennen, dass die Luft-Wasser *WP* die niedrigsten Kosten in der Anschaffung mit sich trägt und somit die Tabellenspitze der zu untersuchenden Systeme anführt.

Nr.	System	IK [€]
1	Luft-Wasser-WP	17110
2	Sole-Wasser-WP (Erdkollektor)	24230
3	Wasser-Wasser-WP	27150
4	Sole-Wasser-WP (Erdsonden)	30540
ΔP System 1 zu System 4		-13430
ΔP System 1 zu System 3		-10040
ΔP System 1 zu System 2		-7120
ΔP System 2 zu System 4		-6310
ΔP System 3 zu System 4		-3390
ΔP System 2 zu System 3		-2920

Tabelle 11: Investitionskostenbewertung der einzelnen Systeme

Der Grund liegt darin, dass die Erschließungskosten für die *WQ* bei Luft-Wasser-*WP* entfallen. Aufwendige Bohrungen, Grabungen, Herstellung von Brunnenanlagen und der gleichen sind hierbei nicht durchzuführen, somit sind je nach Aufstellungsart lediglich Zubehörteile (Kältemittelleitungen, Luftkanäle, Wetterschutzgitter usw.) zu berücksichtigen, was natürlich den doch beachtlichen Preisunterschied zu den übrigen Systemen erklärt. Bei den oben angeführten Kosten für die Luft-Wasser-*WP* handelt es sich ausschließlich um Systeme mit Split-Ausführung (Verdampfer im Freien und *WP* im Gebäude aufgestellt). Die Sole-Wasser-*WP* mit Erdsonden hat hingegen die höchsten *IK* von allen hier im Vergleich stehenden Systemen. In diesem Fall müssen für die Erschließung der *WQ* gemäß der Projektierung in *Kapitel 6* mindestens zwei Tiefenbohrungen mit jeweils etwa 60 m errichtet werden. Dies erfordert teure Spezialmaschinen (Bohrgeräte, LWK, Bagger) und entsprechend ausgebildete Fachleute, was natürlich anhand der hohen Kosten in *Tabelle 10* für die Erschließung der *WQ* nachvollziehbar ist. Die Wasser-Wasser-*WP* sowie auch die

Sole-Wasser-WP mit Erdkollektoren liegen kostenmäßig relativ nahe beinander und bilden somit das Mittelfeld der zu untersuchenden Systeme.

Weiters zeigt *Tabelle 11* die Gegenüberstellung der Investitionsmehr- bzw. –minderkosten jeweils zweier im Vergleich stehender Systeme. Betrachtet man bspw. die Kosten der Luft-Wasser-WP mit jenen der Sole-Wasser-WP mittels Erdsonden (ΔP System 1 zu System 4), so ist zu erkennen, dass sich in diesem Fall der größte Preisvorteil in der Anschaffung, nämlich eine Kosteneinsparung von 13.400 €, ergibt. Hingegen ergibt sich bei der Sole-Wasser-WP mittels Erdkollektor im Vergleich zur Wasser-Wasser-WP (ΔP System 2 zu System 3) die geringste Preisdifferenz, da die Kosten zur Erschließung der WQ nach *Tabelle 10* relativ nahe beieinander liegen. Würde man einzig und allein von den *IK* ausgehen, sprich ohne Berücksichtigung der jährlichen *BK* über einen definierten Zeitraum, wäre die Luft-Wasser-WP klarerweise das ökonomischste System im Vergleich zu allen anderen Systemen.

7.3 Betriebskosten der einzelnen Systeme

Für die Ermittlung der jährlichen *BK* ist der *JEV* – also die aufgenommene elektrische Energie des Wärmeerzeugers – erforderlich. Diese Werte wurden bereits bei der Projektierung in *Kapitel 6.5* mit *Tabelle 9* anschaulich zusammengefasst und dargestellt. Die zuvor erzielten Ergebnisse werden daher im Anschluss in *Tabelle 12* übertragen. Ebenso ist die Kenntnis über den Stromtarif *ST* des lokalen Stromanbieters von Nöten. Manche Energielieferanten bieten auch Sondertarife für *WP* mit eigens dafür vorgesehenen *EVU-Sperrzeiten* an. Da aber bereits bei der Projektierung der Systeme keine *Sperrzeiten* berücksichtigt wurden und diese somit auch nicht in den Leistungsbedarf der *WP* eingerechnet sind, wird auch hier auf einen speziellen *ST* für *WP* verzichtet. Für die Gegenüberstellung der anfallenden *BK* wird der EVN Tarif „Optima Float“ ausgewählt. Die nachfolgende *Formel 7.1* zeigt zunächst die Berechnung der jährlichen *BK* der *WP*:

$$JBK \left[\frac{\text{€}}{\text{a}} \right] = JEV \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] * ST \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \quad (7.1)$$

JBK am Beispiel der Wasser-Wasser-WP:

$$JBK = 3699 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] * 0,137318 \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] = 507,93 \left[\frac{\text{€}}{\text{a}} \right] \quad (7.2)$$

Das Ergebnis entsprechend *Formel 7.2* versteht sich exklusive *MwSt.* und ist in *Tabelle 12* wiederzufinden. Die *BK* aller übrigen Systeme können analog wie oben durchgeführt, ermittelt werden. Der aktuelle *ST* wird mit Hilfe des Internetportals „Durchblicker“ [25] generiert. Das Berechnungstool dieser Seite ermöglicht es, den *JEV* und die regionalen Standortdaten einzutragen, um im Anschluss aus einer Vielzahl möglicher Stromanbieter auswählen zu können und über dessen Stromtarife Einsicht zu erhalten. Wie bereits erwähnt, wird im Zuge dieser Arbeit und für die weitere ökonomische Betrachtungsweise der „Optima Float“ Tarif des Stromanbieters EVN gewählt [25]. Der derzeitige Strompreis ist in *Tabelle 12* wiederzufinden.

Positionsbeschreibung	Wasser-Wasser WP	Sole-Wasser-WP (Erdkollektor)	Sole-Wasser-WP (Erdsonde)	Luft-Wasser- WP
Jahreswärmebedarf Gebäude Q_H [kWh/a]	17570			
durchschnittliche JAZ	4,75	4,35	4,35	3,80
Jahresenergie- verbrauch Q_F [kWh/a]	3699	4039	4039	4624
Stromtarif EVN [€/kWh]	0,137318 ³¹			
Jahresbetriebskosten ohne <i>MwSt.</i> [€/a]	507,93	554,64	554,64	634,92
Mehrwertsteuer 20%	101,59	110,93	110,93	126,98
Jahresbetriebskosten inkl. <i>MwSt.</i> [€/a]	609,52	665,57	665,57	761,90
Jahresbetriebskosten in 20 Jahren [€] ³²	12190,37	13311,32	13311,32	15237,96

Tabelle 12: Betriebskostenvergleich der einzelnen WPS

Tabelle 12 stellt die jährlichen *BK* der vier projektierten WPS gegenüber. Um ein besseres quantitatives Bild über die Höhe der anfallenden Kosten zu erhalten, sind hier auch die *BK* nach 20 Jahren angeführt. Da es praktisch unmöglich ist, Prognosen über die Energiepreisentwicklung der nächsten Jahrzehnte zu treffen und – wie bereits erwähnt – die Systeme

³¹ EVN Tarif „Optima Float“ – Stand Oktober 2015, Preis exkl. *MwSt.* Da es sich um einen sogenannten Float-Tarif handelt, wird der Strompreis monatlich, auf Basis des österreichischen Strompreisindex *ÖSPI* angepasst [25].

³² Die *JBK* nach 20 Jahren verstehen sich ohne Berücksichtigung von Strompreisentwicklungen.

ohnehin einheitlich Energie in Form von Strom beziehen, wird bei der Gegenüberstellung des 20-jährigen Betriebskostenvergleichs mit einem konstanten *ST* über die laufenden Jahre gerechnet. Das bedeutet, dass Preissteigerungsraten von Strom hier nicht berücksichtigt werden.

Um dem Leser auch hier ein besseres Bild zu geben, ist die Höhe der jährlich anfallenden *BK* der einzelnen Systeme in der nachfolgenden *Abbildung 32* noch einmal grafisch dargestellt.

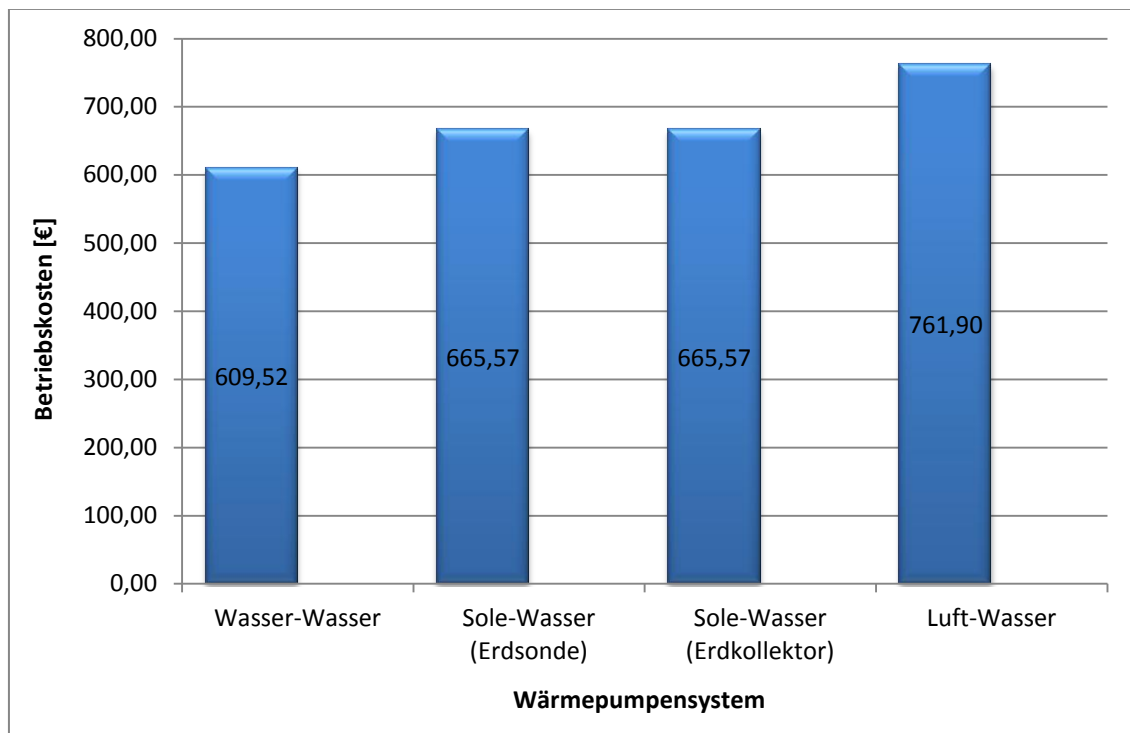


Abbildung 32: Betriebskostenvergleich der einzelnen *WPS* grafisch³³

Wie im Balkendiagramm ersichtlich, sind an der horizontalen Achse (Abszisse) die im Vergleich stehenden *WPS* aufgetragen. Die vertikale Achse (Ordinate) stellt die Höhe der anfallenden *BK* in Euro dar.

7.3.1 Resümee aus den ermittelten Betriebskosten

In *Tabelle 13* sind die *BK* noch einmal übersichtlich und chronologisch geordnet – beginnend mit dem günstigsten System – abgebildet.

³³ Preisangaben inkl. *MwSt.* und ohne Berücksichtigung von Strompreisentwicklungen und geförderten *ST*

Nr.	System	BK [€/a]	BK nach 20 Jahren [€]
1	Wasser-Wasser-WP	609,52	12190,37
2	Sole-Wasser-WP	665,57	13311,32
3	Luft-Wasser-WP	761,90	15237,96
	ΔP System 1 zu System 2	- 56,05	-1120,95
	ΔP System 2 zu System 3	-96,33	-1926,64
	ΔP System 1 zu System 3	-152,38	-3047,59

Tabelle 13: Betriebskostenbewertung der einzelnen Systeme

Dabei ist eindeutig zu erkennen, dass die Wasser-Wasser *WP* die niedrigsten Kosten im laufenden Betrieb verursacht und somit die Tabellenspitze anführt. Wie bereits schon mehrfach im theoretischen Teil dieser Diplomarbeit erwähnt, liegt der Grund darin, dass Wasser-Wasser-*WP* aufgrund ihrer relativ hohen und konstanten Quelltemperatur von etwa 10°C über das gesamte Jahr hinweg, die höchsten *JAZ* und somit auch die niedrigsten *BK* von allen hier zu untersuchenden Systemen erreichen. Luft-Wasser-*WP* hingegen verursachen die höchsten jährlichen *BK*, da sie auch die geringsten *JAZ* im Vergleich zu den anderen Systemen erreichen. Auch diese Begründung muss an dieser Stelle nicht mehr näher erläutert werden und kann bei Bedarf in den vorherigen Kapiteln nachgelesen werden. Betrachtet man das System Sole-Wasser, müsste man genau genommen zwischen Sole-Tiefsonde und Sole-Erdkollektor differenzieren. Da aber in beiden Fällen bei der Projektierung von einer konstanten Quelltemperatur von 0°C (Betriebspunkt B0/W35 – Normbezug nach DIN EN 14511-2) ausgegangen wurde, sind die *BK* beider Systeme ident und daher kann das System Sole-Wasser hier verallgemeinert werden. Bei den *IK* hingegen ist auf alle Fälle zwischen den beiden Systemen zu unterscheiden, da die Anschaffungskosten für Tiefsonden – allen voran die Kosten für die Erschließung der *WQ* – doch um einiges höher sind als die bei der Sole-Wasser-*WP* mit Flachkollektoren.

Die zweite Erkenntnis, die aus *Tabelle 13* hervorgeht, ist, dass bei der Wasser-Wasser-*WP* im Vergleich zur Luft-Wasser-*WP* (ΔP System 1 zu System 3) etwa 152 € jährlich an *BK* eingespart werden können, was über einen Zeitraum von 20 Jahren gesehen eine Kostenersparnis von etwa 3048 € bedeutet.³⁴ Vergleicht man nun die Wasser-Wasser-*WP* mit der Sole-Wasser-*WP* (ΔP System 1 zu System 2), so ist die jährliche Preiseinspa-

³⁴ Es sei hier noch einmal angemerkt, dass bei diesem Vergleich der Strompreis über die Jahre hinweg als konstant angesehen wird und somit etwaige Energiepreiserhöhungen nicht berücksichtigt werden.

nung nur mehr etwa ein Drittel von dem der Luft-Wasser-WP und somit bedeutend geringer. Würde man bei der ökonomischen Bewertung ausschließlich die *BK* in Betracht ziehen, so wäre hier klarerweise die Wasser-Wasser-WP das lukrativste Energiesystem. Natürlich muss aber auch im Vorfeld geprüft werden, ob die Voraussetzungen zur Erschließung der *WQ* Wasser (Wasserqualität, Aufnahmeleistung des Schluckbrunnens usw.) überhaupt gegeben sind.

7.4 Kostenvergleichsrechnung *KVR*

Die *KVR* ist ein Element des statischen Verfahrens und wird in der Praxis anhand zweier Problemstellungen in Anwendung gebracht:

- 1) Alternativenvergleich bzw. Auswahlproblem
- 2) Ersatzproblem

Letzteres kommt zum Einsatz, wenn eine bereits bestehende Anlage ersetzt oder weiterbetrieben werden soll. Da diese Arbeit aber die Neuanschaffung eines Energiesystems zum Inhalt hat und somit festgestellt werden soll, welches der vier Systeme kostentechnisch im Vorteil liegt, erfolgt die Untersuchung der Anlagen anhand des Alternativenvergleichs. Das Ersatzproblem wird somit nicht näher behandelt [26] S.168, S.169. Die Entscheidung welche Anlage kostengünstiger ist, wird durch Anwendung des Kostenkriteriums nach *Gleichung 7.5* erzielt, indem immer jeweils zwei Systeme gegenübergestellt und diese aufgrund der durchschnittlichen jährlichen *GK* bewertet werden. Die Resultate infolge des ökonomischen Vergleichs sind in *Tabelle 14* bzw. in *Tabelle 15* ersichtlich. Der *Betrachtungszeitraum* für Heizungen sowie die rechnerische *Nutzungsdauer* für elektrisch betriebene *WP* wird gemäß *VDI 2067 Blatt 1* gewählt.³⁵ Kapitalverzinsung, Investitionsförderungen und Preissteigerungsraten für Strom sowie Ersatzbeschaffungen während des *Betrachtungszeitraumes* werden für die Ermittlung der Vorteilhaftigkeit der zu untersuchenden Anlagen in Bezug auf das Musterhaus nicht berücksichtigt.

³⁵ *Betrachtungszeitraum* Heizung 20 Jahre; rechnerische *Nutzungsdauer* gemäß *Tabelle A2*: Luft-Wasser-WP (Elektro) 18 Jahre; Sole-Wasser-WP (Elektro) und Wasser-Wasser-WP (Elektro) 20 Jahre [28] S. 11, S.22

7.4.1 Kostenkriterium beim Alternativenvergleich

Gleichung 7.3 verdeutlicht, dass eine Investition I wirtschaftlicher ist als eine Investition II, wenn ihre durchschnittlichen Jahreskosten K_I geringer sind als K_{II} .

$$K_I < K_{II} \quad (7.3)$$

K_I	Gesamtkosten Anlage I [€/Jahr]
K_{II}	Gesamtkosten Anlage II [€/Jahr]

In der Praxis muss man bei den *GK* zwischen den Kapitalkosten (Abschreibung, Zinsen) und den *BK* (Strom, Instandhaltung usw.) differenzieren. In Anbetracht dessen kann das Kostenkriterium laut Gleichung 7.3 – für die Annahme, dass der Restwert = 0 ist – wie folgt angeschrieben werden:

$$BK_I + \underbrace{\frac{IK_I}{n_I}}_{\text{kalk. Abschr.}} + \underbrace{\frac{IK_I}{2} * i}_{\text{kalk. Zinsen}} < BK_{II} + \frac{IK_{II}}{n_{II}} + \frac{IK_{II}}{2} * i \quad (7.4)$$

BK_I	Betriebskosten Anlage I [€/Jahr]
BK_{II}	Betriebskosten Anlage II [€/Jahr]
IK_I	Investitionskosten Anlage I [€]
IK_{II}	Investitionskosten Anlage II [€]
n_I	Nutzungsdauer Anlage I [Jahre]
n_{II}	Nutzungsdauer Anlage II [Jahre]
i	Kalkulationszinssatz [%]

Im weiteren Verlauf sollen Zinsforderungen vom Investor vernachlässigt werden. Der Kalkulationszinssatz i ergibt sich also zu Null und der Anteil der kalkulatorischen Zinsen entfällt in Gleichung 7.4. Das vereinfachte Kostenkriterium für den Alternativenvergleich wird in Gleichung 7.5 dargestellt und schließlich in Tabelle 15 in Anwendung gebracht.

$$BK_I + \frac{IK_I}{n_I} < BK_{II} + \frac{IK_{II}}{n_{II}} \quad (7.5)$$

Mit diesem Kriterium können nun die jeweiligen *WPS* aufgrund ihrer jährlichen Gesamtkostenaufwendungen bewertet werden. Die Ertragsseite bleibt bei dieser Methode des statischen Verfahrens vollkommen unberührt [26] S.169-171.

7.4.2 Ermittlung der Gesamtkosten

Aufgrund der zuvor ermittelten einmaligen *IK* und der laufenden *BK*, können nun die *GK* der jeweiligen Systeme bestimmt werden. Diese sind am Ende von *Tabelle 14* übersichtlich dargestellt. Für die Berechnung der *GK* wurde in Excel ein Berechnungsprogramm erstellt, um anschließend auch Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der vier projektierten Systeme treffen zu können. Kalkulationszinssatz und Restwert können bei Bedarf in die dafür vorgesehenen Eingabefelder ergänzt werden und somit in der Berechnungsgrundlage berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, werden diese beiden Kennwerte in dieser Arbeit mit Null angesetzt und somit nicht weiter berücksichtigt.

Positionsbeschreibung	WW-WP	SW-WP (Erdkollektor)	SW-WP (Erdsonden)	LW-WP
Investitionskosten <i>IK</i> [€]	27150,00	24230,00	30540,00	17110,00
Restwert [€]	0,00	0,00	0,00	0,00
Nutzungsdauer [Jahre]	20,00	20,00	20,00	18,00
Kalkulationszinssatz [%]	0,00	0,00	0,00	0,00
kalk. Abschreibung [€/Jahr]	1357,50	1211,50	1527,00	950,56
kalk. Zinsen [€/Jahr]	0,00	0,00	0,00	0,00
Fixe Kapitalkosten [€/Jahr]	1357,50	1211,50	1527,00	950,56
Betriebskosten <i>BK</i> [€/Jahr]	609,52	665,57	665,57	761,90
Gesamtkosten [€/Jahr]	1967,02	1877,07	2192,57	1712,46
Gesamtkosten [€ nach 20 Jahren] = <i>Betrachtungszeitraum</i>	39340,40	37541,40	43851,40	34249,11

Tabelle 14: Gesamtkostenvergleich verschiedener *WPS*³⁶

Die einmalig anfallenden *IK* werden auf die betriebliche *Nutzungsdauer* aufgeteilt, wodurch sich die in der *Tabelle 14* ersichtlichen fixen Kapitalkosten ergeben. Dies wird auch durch *Gleichung 7.4* veranschaulicht. Aus der Summe der fixen Kapitalkosten und der *BK*

³⁶ Die Tabelle wurde mit Excel unter Anlehnung an [26] S.176 erstellt. Sämtliche Preisangaben verstehen sich inklusive *MwSt.* und haben ausschließlich Gültigkeit auf das in *Kapitel 6* dimensionierte Musterhaus.

ergeben sich dann die *GK*, welche für die ökonomische Bewertung der Systeme entsprechend *Tabelle 15* entscheidend sind. Um dem Leser ein besseres Bild im Hinblick auf die rechnerisch ermittelten Beträge zu gewähren, ist die Entwicklung der *GK* über den zuvor festgelegten *Betrachtungszeitraum* in der nachfolgenden *Abbildung 33* grafisch dargestellt.

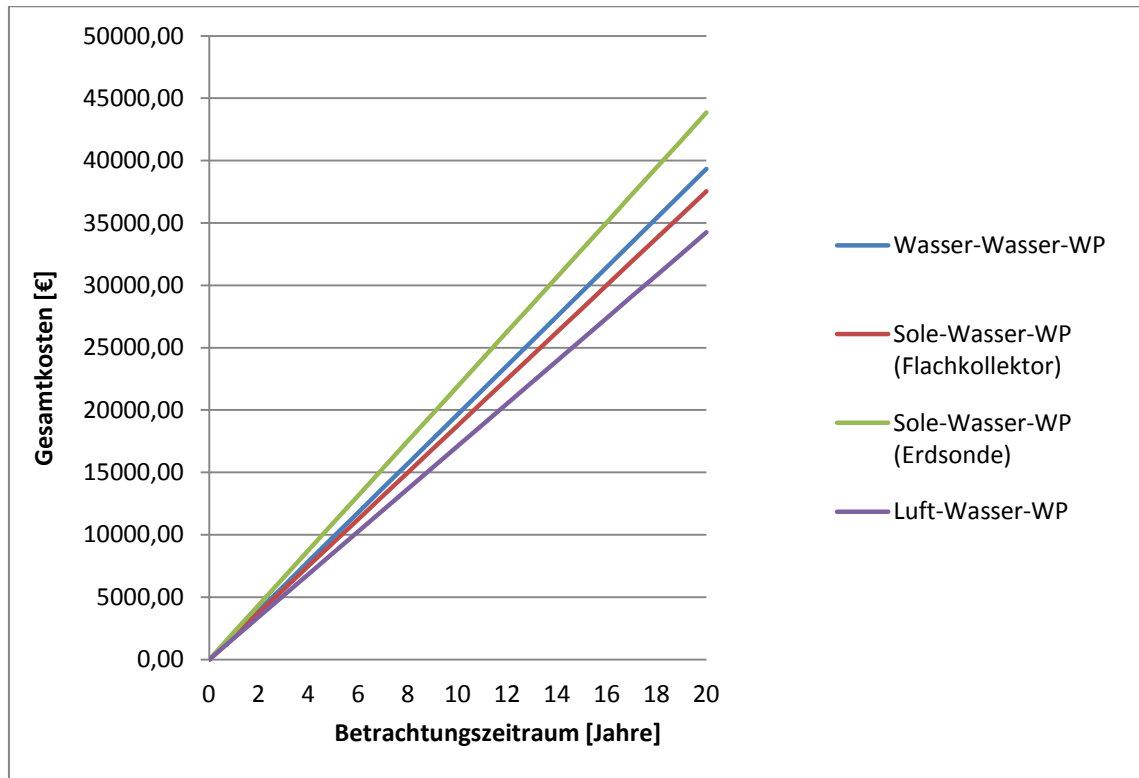


Abbildung 33: Grafische Entwicklung der Gesamtkosten

Anhand des Diagrammes kann man auf den ersten Blick erkennen, dass die Sole-Wasser-WP mit Erdsonden (grüne Kennlinie) – im zuvor definierten *Betrachtungszeitraum* – die höchsten Kosten aller zu untersuchenden Systeme darstellt. Die Kennlinie der Luft-Wasser-WP (violette Kennlinie) verläuft hingegen flacher und ist somit mit den niedrigsten *GK* das lukrativste Energiesystem. Dieses Erkenntnis wird anschließend auch noch einmal explizit anhand der Ergebnisse im Zuge des Alternativenvergleichs in *Tabelle 15* veranschaulicht.

7.4.3 Ökonomische Bewertung anhand des Alternativenvergleichs

Die ökonomische Bewertung und dessen Aussage ob eine Investition I bzw. die Anlage I wirtschaftlicher ist als eine Investition II bzw. die Anlage II, wird anhand des Kostenkriteriums nach *Gleichung 7.3* getroffen. Die Bezugsbasis hierfür bilden die in der *Tabelle 14*

ermittelten jährlichen *GK*. In der nachfolgende *Tabelle 15* werden die Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Systeme, die mit Hilfe des Alternativenvergleichs ($K_I < K_{II}$) bewertet werden, getroffen.

	Anlage I K_I	Anlage II K_{II}	Kostenkriterium $K_I < K_{II}$
<i>GK</i> [€/Jahr]	Luft-Wasser-WP 1712,46	Wasser-Wasser-WP 1967,02	Anlage I ist wirtschaftlicher (Kriterium erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	Luft-Wasser-WP 1712,46	SW-WP (Erdsonden) 2192,57	Anlage I ist wirtschaftlicher (Kriterium erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	Luft-Wasser-WP 1712,46	SW-WP (Erdkollektor) 1877,07	Anlage I ist wirtschaftlicher (Kriterium erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	SW-WP (Erdkollektor) 1877,07	Luft-Wasser-WP 1712,46	Anlage I ist nicht wirtschaftlicher (Kriterium nicht erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	SW-WP (Erdkollektor) 1877,07	Wasser-Wasser-WP 1967,02	Anlage I ist wirtschaftlicher (Kriterium erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	SW-WP (Erdkollektor) 1877,07	SW-WP (Erdsonden) 2192,57	Anlage I ist wirtschaftlicher (Kriterium erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	Wasser-Wasser-WP 1967,02	Luft-Wasser-WP 1712,46	Anlage I ist nicht wirtschaftlicher (Kriterium nicht erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	Wasser-Wasser-WP 1967,02	SW-WP (Erdkollektor) 1877,07	Anlage I ist nicht wirtschaftlicher (Kriterium nicht erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	Wasser-Wasser-WP 1967,02	SW-WP (Erdsonden) 2192,57	Anlage I ist wirtschaftlicher (Kriterium erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	SW-WP (Erdsonden) 2192,57	Luft-Wasser-WP 1712,46	Anlage I ist nicht wirtschaftlicher (Kriterium nicht erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	SW-WP (Erdsonden) 2192,57	SW-WP (Erdkollektor) 1877,07	Anlage I ist nicht wirtschaftlicher (Kriterium nicht erfüllt)
<i>GK</i> [€/Jahr]	SW-WP (Erdsonden) 2192,57	Wasser-Wasser-WP 1967,02	Anlage I ist nicht wirtschaftlicher (Kriterium nicht erfüllt)

Tabelle 15: Ökonomische Bewertung der WPS anhand des Alternativenvergleichs

Der Aufbau von *Tabelle 15* ist einfach gehalten, sodass diese keiner weiteren Erklärung bedarf. Die wesentliche Erkenntnis ist, dass sich der Einsatz einer Luft-Wasser-WP immer rentiert und somit dieses System am wirtschaftlichsten in Bezug auf das in *Kapitel 6* dimensionierte fiktive Musterhaus ist, da es zweifelsfrei die geringsten Kosten über einen

Zeitraum von 20 Jahren zur Folge hat. Selbst wenn man den *Betrachtungszeitraum* auf 40 Jahre festlege, würde sich an dieser Tatsache nichts ändern. Im Umkehrschluss dazu ist die Sole-Wasser-WP mit Erdsonden das unwirtschaftlichste System im Vergleich zu allen anderen, da hierfür sehr hohe Kosten bei der Investition, allen voran bei der Erschließung der WQ anfallen. Ihr Einsatz in Bezug auf das Musterhaus wäre aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll und würde sich im Vergleich zu den anderen Systemen, vor allem zur Luft-Wasser-WP, erst nach vielen Jahren amortisieren. Nähere Informationen dazu in *Kapitel 7.5*.

7.4.4 Resümee aus den ermittelten Gesamtkosten

In *Tabelle 16* sind zum einen die GK noch einmal übersichtlich und chronologisch geordnet – beginnend mit dem günstigsten System; zum anderen werden die Minder- bzw. Mehrkosten jeweils zweier im Vergleich befindlichen Systemen analysiert.

Nr.	System	GK [€/a]	GK in 20 Jahren [€]
1	Luft-Wasser-WP	1712,46	34249,11
2	Sole-Wasser-WP (Erdkollektor)	1877,07	37541,40
3	Wasser-Wasser-WP	1967,02	39340,40
4	Sole-Wasser-WP (Erdsonden)	2192,57	43851,40
	ΔP System 1 zu System 4	-480,11	-9602,29
	ΔP System 2 zu System 4	-315,50	-6310,00
	ΔP System 1 zu System 3	-254,56	-5091,29
	ΔP System 3 zu System 4	-225,55	-4511,00
	ΔP System 1 zu System 2	-164,61	-3292,29
	ΔP System 2 zu System 3	-89,95	-1799,00

Tabelle 16: Gesamtkostenbewertung der einzelnen Systeme

Wie bereits schon zuvor festgestellt, ist die Luft-Wasser-WP das ökonomischste Energiesystem für das in *Kapitel 6* dimensionierte Musterhaus. Im Vergleich zur Sole-Wasser-WP mittels Erdsonden (ΔP System 1 zu System 4) ergibt sich eine jährliche Preisdifferenz von etwa 480 €, was über den *Betrachtungszeitraum* von 20 Jahren einer Kosteneinsparung von über 9600€ entspricht. Vergleicht man System 2 mit System 3 so erkennt man, dass die jährlich anfallenden GK dieser beiden Systeme sehr nahe beieinander liegen. In diesem

Fall beträgt die Kosteneinsparung (ΔP System 2 zu System 3) nur mehr etwa 1800 € nach 20 Jahren.

7.5 Statische Amortisationsrechnung

Zum Abschluss dieser Arbeit soll die Wirtschaftlichkeit der einzelnen *WPS* auch noch anhand der statischen Amortisationsrechnung untersucht werden. Die Grundbasis hierfür ist die *Amortisationszeit*. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass sich die drei *WPS* im Hinblick auf die kostengünstigste Anlage, nämlich der Luft-Wasser-*WP*, erst nach vielen Jahren amortisieren. Dies gilt insbesondere für die Sole-Wasser-*WP* mit Tiefenbohrungen. Der Grund liegt darin, dass bei den *IK* doch relativ große Preisunterschiede der Systeme untereinander bestehen und bei den *BK* die Preisdifferenz eher gering ist, da auch Luft-Wasser-*WP* mittlerweile bei entsprechender Auslegung und je nach Gerätetyp und Hersteller relativ hohe *JAZ* erreichen. Am Ende dieses Kapitels soll auch kurz die Amortisations-situation der *WPS* im Vergleich zu fossilen Energiesystemen dargestellt werden, um ein besseres quantitatives Bild zu erhalten und simultan zu verdeutlichen, wie effizient und ökonomisch *WP* im Vergleich zu konventionellen Systemen sind.

7.5.1 Ermittlung der Amortisationszeit

Bei der Bestimmung der statischen *Amortisationszeit* werden, wie auch bereits bei der *KVR*, Zinsansprüche des Investors, Energiepreissteigerungen und Inflation nicht berücksichtigt. Die Ermittlung der tatsächlichen *Amortisationszeit* erfolgt im Anschluss mittels der Durchschnittsrechnung, welche konstante Jahresbeträge voraussetzt. Für die Annahme, dass der Restwert = 0 ist, kann diese gemäß *Gleichung 7.6* wie folgt ausgedrückt werden [26] S. 213, S.214:

$$t = \frac{A}{\emptyset (e - a)} \quad (7.6)$$

t	Amortisationszeit [Jahre]
A	Anschaffungsauszahlung bzw. Mehr- oder Minderinvestitionskosten [€]
$(e-a)$	jährliche Nettoeinzahlung bzw. Kostenersparnis [€/Jahr]

Gleichung 7.6 wird in der nachfolgenden *Tabelle 17* in Anwendung gebracht, wodurch sich dann die entsprechende *Amortisationszeit* der jeweiligen Systeme ergibt. Wie bereits in *Kapitel 7.4* festgestellt wurde, handelt es sich bei der Luft-Wasser-WP um das kostengünstigste und somit ökonomischste Energiesystem für das in *Kapitel 6* dimensionierte Musterhaus. Gleichzeitig haben Luft-Wasser-WP aber auch die höchsten jährlichen *BK* von allen hier im Vergleich stehenden Systemen. Deshalb werden sie im weiteren Verlauf als Bezugsbasis für die Bestimmung der *Amortisationszeit* der restlichen Systeme herangezogen. In der nachfolgenden Tabelle ergibt sich demnach folgendes Bild:

Amortisationsbeispiel	Anschaffungsauszahlung A[€]	Nettoeinzahlung (e-a) [€/Jahr]	Amortisationszeit t [Jahre]
Sole-Wasser-WP (Erdsonden) vs. Luft-Wasser-WP	13430,00	96,33	139,42
Sole-Wasser-WP (Erdkollektor) vs. Luft-Wasser-WP	7120,00	96,33	73,91
Wasser-Wasser-WP vs. Luft-Wasser-WP	10040,00	152,38	65,89
Wasser-Wasser-WP vs. Sole-Wasser-WP (Erdkollektor)	2920,00	56,05	52,10
Wasser-Wasser-WP vs. Sole-Wasser-WP (Erdsonden)	-3390,00	56,05	ab Inbetriebnahme

Tabelle 17: Amortisationszeit einzelner WPS³⁷

Generell gilt: Ist der Betrag der Anschaffungsauszahlung positiv, so handelt es sich beim Amortisationsbeispiel um Mehrkosten bei der Investition; bei einem negativen Vorzeichen um Minderkosten. System-Minderkosten haben zur Folge, dass sich die Investition bereits ab der *IBN* amortisiert. Die Nettoeinzahlungen entsprechen der jährlichen *BK*-Einsparung des zu betrachtenden Amortisationsbeispiels.

Die wesentliche Erkenntnis, die aus *Tabelle 17* hervorgeht, ist, dass die Wasser-Wasser-WP die kürzeste *Amortisationszeit* hat. Ihr Einsatz würde sich aber dennoch erst nach etwa 66 Jahren bezahlt machen und würde erst ab dann, vor der Luft-Wasser-WP, als das ökonomischste System gelten. Die Sole-Wasser-WP mit Erdkollektoren würde sich gemäß *Tabelle 17* erst nach etwa 74 Jahren amortisieren und die Sole-Wasser-WP mit Erdsonden gar erst nach etwa 139 Jahren. Diese Zahlen bestärken hier noch einmal die festge-

³⁷ Angaben ohne Berücksichtigung von Kreditzinsen und Energiepreissteigerungen.

stellte Tatsache der zuvor durchgeführten *KVR*, nämlich dass die Luft-Wasser-WP – längerfristig gesehen – zweifellos das kostengünstigste Energiesystem ist.

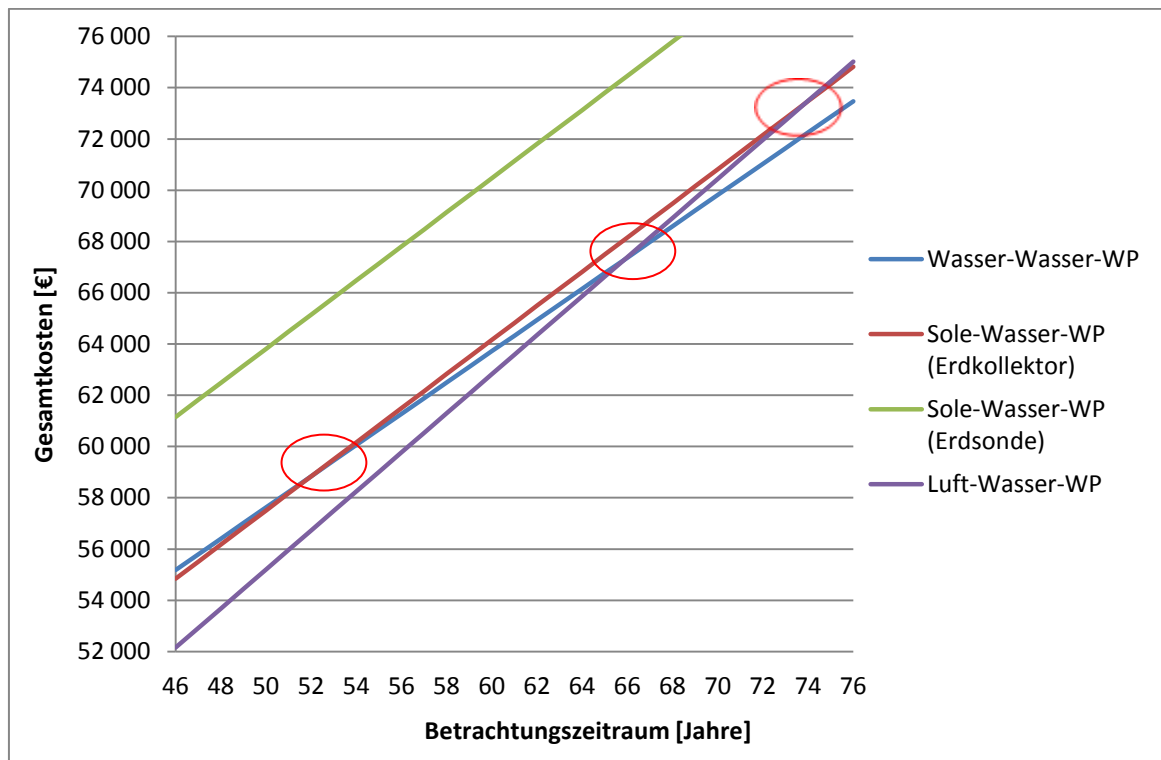


Abbildung 34: Grafische Amortisationszeit einzelner WPS

Die oben gewonnene Erkenntnis wird in *Abbildung 34* auch noch einmal grafisch hervorgehoben. Die Schnittpunkte jeweils zweier Linien (z.B. der blauen und der roten Linie) entsprechen der *Amortisationszeit*. Die grüne Linie (Sole-Wasser-WP mit Erdsonden) würde die violette Linie (Luft-Wasser-WP) erst nach einem *Betrachtungszeitraum* von 139 Jahren schneiden – dies entspricht der Zeit, bis zu der die Luft-Wasser-WP wirtschaftlicher arbeitet als die Sole-Wasser-WP mit Erdsonden. Da der *Betrachtungszeitraum* gemäß *Abbildung 34* aber nur eine Bandbreite von 30 Jahren enthält, ist der Schnittpunkt dieser beiden Kennlinien im obigen Diagramm nicht ersichtlich.

7.5.2 Amortisationsbetrachtung Wärmepumpe vs. fossile Energiesysteme

Wie vorhin festgestellt, amortisieren sich die WPS untereinander erst nach vielen Jahrzehnten, sodass sich keines der Systeme gegenüber der Luft-Wasser-WP im zuvor definierten *Betrachtungszeitraum* von 20 Jahren bezahlt machen würde. Um generell die ökonomischen Vorteile der WPS herauszufiltern und dadurch ihre positiven Aspekte aus *Kapitel 3*

zu bestärken, soll abschließend die Amortisationssituation im Vergleich zu fossilen Energiesystemen dargestellt werden. Im konkreten Fall soll der Vergleich zum einem zur Ölheizung und zum anderem zur Gas-BWH gezeigt werden. Hierfür ist jedoch wie bereits auch bei den WPS, die Kenntnis der System-Gesamtkosten erforderlich. Die Zusammensetzung der *IK* zum einen und der *BK* zum anderen, wird im Anhang anhand von *Tabelle 19* für die Ölheizung bzw. anhand von *Tabelle 20* für die Gas-BWH anschaulich dargestellt. *Tabelle 18* zeigt die Amortisationszeit der WPS zu den fossilen HZS.

Amortisationsbeispiel	Anschaffungs- auszahlung A[€]	Nettoeinzahlung (e-a) [€/Jahr]	Amortisationszeit t [Jahre]
Luft-Wasser-WP vs. Ölheizung	-8210,00	986,10	ab Inbetriebnahme
Luft-Wasser-WP vs. Gas-Brennwertheizung	-3506,00	760,10	ab Inbetriebnahme
Sole-Wasser-WP (Erdkollektor) vs. Ölheizung	-1090,00	1082,43	ab Inbetriebnahme
Sole-Wasser-WP (Erdkollektor) vs. Gas-Brennwertheizung	3614,00	856,43	4,22
Wasser-Wasser-WP vs. Ölheizung	1830,00	1138,48	1,61
Wasser-Wasser-WP vs. Gas-Brennwertheizung	6534,00	912,48	7,16
Sole-Wasser-WP (Erdsonden) vs. Ölheizung	5220,00	1082,43	4,82
Sole-Wasser-WP (Erdsonden) vs. Gas-Brennwertheizung	9924,00	856,43	11,59

Tabelle 18: Amortisationszeit WP vs. fossile Energiesysteme³⁸

Bereits jetzt kann man schon eindeutig erkennen, dass die Luft-Wasser-WP nach wie vor das preiswerteste Heizsystem von allen hier im Vergleich stehenden Anlagen ist, da bereits deren *IK* deutlich geringer sind als die der fossilen Energiesysteme.

Noch besser ist diese Tatsache in grafischer Form anhand von *Abbildung 35* zu erkennen. Somit ist am ersten Blick ersichtlich, dass sich die Luft-Wasser-WP schon vom ersten Tag an amortisiert.

³⁸ Angaben ohne Berücksichtigung von Kreditzinsen und Energiepreissteigerungen.

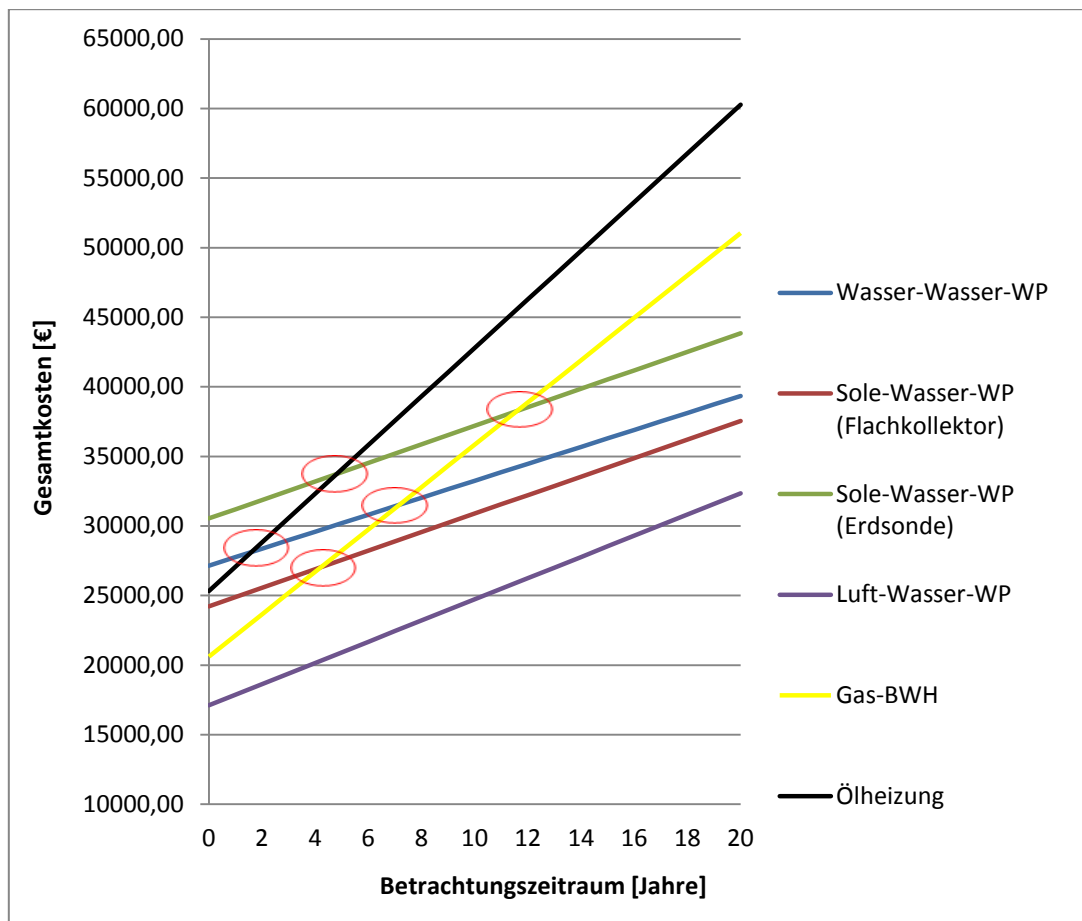


Abbildung 35: Grafische Amortisationszeit WP vs. fossile Energiesysteme

Gemäß *Abbildung 35* wird der Kostenverlauf der Ölheizung durch die schwarze Linie repräsentiert, die Gas-BWH wird durch die gelbe Linie dargestellt. Wie bereits zuvor erwähnt, ergibt sich aus dem Schnittpunkt zweier Linien die jeweilige *Amortisationszeit*.

Eine wichtige Erkenntnis, die aus dem Diagramm hervorgeht, ist, dass sich das teuerste WPS, nämlich die Sole-Wasser-WP mit Erdsonden, nach etwa 12 Jahren vollständig amortisiert. Bei allen übrigen Systemen kann man nahezu von einer sofortigen Amortisation ausgehen, insbesondere bei der Luft-Wasser-WP. Im Vergleich zu den fossilen Energiesystemen lohnen sich alle WPS innerhalb des zuvor definierten *Betrachtungszeitraumes*, da deren GK nach 20 Jahren wesentlich geringer ausfallen. Eine weitere bedeutende Erkenntnis ist, dass die GK am Ende des *Betrachtungszeitraumes* der Ölheizung nahezu doppelt so hoch sind wie die der Luft-Wasser-WP. Dieses Resultat bringt die ökonomischen Vorteile der regenerativen Energiesysteme in Einklang mit dem theoretischen Teil dieser Arbeit.

Das Fazit dieses Kapitels ist, dass es keine besseren Alternativen zur WP gibt. Dies gilt insbesondere für den Einsatz in Neubauten gemäß *EnEV 2009/2014*.

8 Schlussfolgerung und Ausblick

Schwerpunkt dieser Arbeit war es, dass ökonomischste *WPS* zur Deckung des Energiebedarfs (Heizung und *WWB*) eines fiktiven Musterhauses, welches dem heutigen Baustandard eines Neubaus bzw. eines *NEH* entsprechen soll, herauszufinden.

Im theoretischen Teil wurde als Einstieg ein Überblick über den österreichischen Energiemarkt, mit Schwerpunkt auf dem Energieverbrauch in Haushalten, vorgestellt. Danach wurden die vielseitigen Vorteile einer *WP*, speziell im Vergleich zu fossilen Energiesystemen, hervorgehoben. Im Anschluss wurden die technologisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen einer *WP* sowie die wesentlichen Bestandteile und der Aufbau einer *WPA* erläutert.

Hauptziel des praktischen Teils war es dann einerseits geeignete *WPS* für das fiktive Musterhaus auszuwählen, um im Anschluss die Projektierung der verschiedenen Anlagen durchzuführen. Andererseits wurden danach mittels der gewonnenen Daten aus der Projektierung die Systeme gegenübergestellt und anhand der Methoden des statischen Rechenverfahrens hinsichtlich der anfallenden *GK* über einen definierten *Betrachtungszeitraum* wirtschaftlich bewertet. Zudem wurde auch ein kurzer Vergleich zu fossilen Energiesystemen gezogen.

Die Wasser-Wasser-*WP* erreichte im Vergleich zu allen anderen Systemen die höchsten *JAZ*, wodurch ihr jährlicher Energieverbrauch zur Deckung des gesamten Gebäudewärmebedarfs am geringsten ist, verbunden mit den niedrigsten Energiekosten. Dies ist die wesentliche Erkenntnis, die aus der Projektierung hervorging. Luft-Wasser-*WP* erreichen hingegen die niedrigsten *JAZ* und unterliegen dabei auch gleichzeitig den höchsten jährlichen Temperaturschwankungen. Zudem werden Luft-Wasser-*WP* zumeist bivalent betrieben, wodurch sich aufgrund der erforderlichen Zusatzheizung die höchsten jährlichen *BK* im Vergleich zu allen anderen Systemen einstellen.

Für das dimensionierte Gebäude mit einem Leistungsbedarf von $9,76 \text{ kW}$ und einem Gebäudewärmebedarf von 17570 kWh/a , konnten folgende Feststellungen anhand der *KVR* hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit getroffen werden: Die Luft-Wasser-*WP* ist nach Ablauf des *Betrachtungszeitraumes* das mit Abstand kostengünstigste System von allen im Vergleich gestandenen und analysierten *WPS*. Mit *GK* von etwa 34.250 € nach 20 Jahren können mit Luft-Wasser-*WP* nahezu 10.000 € im Vergleich zu der teuersten *WP*, nämlich der

Sole-Wasser-WP mit Erdsonden, eingespart werden. Selbst zur Sole-Wasser-WP mit Erdkollektoren sind immerhin noch Kosteneinsparungen von etwa 3.300 € möglich. Im 20-jährigen Heizkostenvergleich gibt es somit keine wirtschaftlich sinnvollere Alternative zur Luft-Wasser-WP.

Auch die Resultate des Amortisationsvergleichs bestärken jene, die bereits anhand des Alternativenvergleichs im Zuge der *KVR* gewonnen wurden. Die Amortisationssituation der *WPS* untereinander gab Aufschluss darüber, dass sich die Wasser-Wasser-WP im Vergleich zur Luft-Wasser-WP erst nach etwa 66 Jahren amortisieren würde. Alle restlichen Systeme würden sich erst nach vielen weiteren Jahrzehnten im Vergleich zur Luft-Wasser-WP bezahlt machen.

Die gewonnene Erkenntnis wurde noch deutlicher, als fossile Energiesysteme (Ölheizung, Gas-BWH) in den Vergleich mit einbezogen wurden. Hierbei war sehr gut zu erkennen, dass sich die Luft-Wasser-WP bereits vom ersten Tag an amortisiert. Ebenso deutlich zu sehen war die Gesamtkosteneinsparungen nach Ablauf des *Betrachtungszeitraums*. Im konkreten Fall betragen die Kostenaufwendungen der Ölheizung beinahe das Doppelte als die der Luft-Wasser-WP. Außerdem kann auch bei allen anderen *WPS* von einer sehr kurzen Amortisationszeit, im Vergleich zu den fossilen Energiesystemen, ausgegangen werden. So ergibt sich die Tatsache, dass sich die teuerste WP, nämlich die Sole-Wasser-WP mit Erdsonden, bereits nach etwa 12 Jahren im Vergleich zur Gas-BWH vollständig amortisiert und Gewinn erwirtschaftet.

Abschließend bleibt nur noch einmal zu betonen, dass von allen untersuchten Wärmepumpentypen, die Luft-Wasser-WP im langfristigen Vergleich die geringsten Kosten für das Musterhaus repräsentiert und dass die *WPS* generell neben ihren ökologischen Vorteilen auch aus ökonomischer Sicht klar als effizientestes Heizungssystem einzustufen sind. Es sei noch einmal angemerkt, dass die quantitativen Berechnungsergebnisse ausschließlich Gültigkeit auf den in dieser Arbeit definierten energetischen Gebäudestandard haben. Wie zu Beginn der Arbeit kurz erwähnt, haben WP auch durch geringe Adaptierungsvorkehrungen die Möglichkeit zur Kühlung des Gebäudes, was oftmals nur mit sehr geringen Zusatzkosten verbunden ist. Über diesen positiven Nebennutzen verfügt kein anderes auf dem Markt etabliertes Heizungssystem. Da die globale Klimaerwärmung – aus zukunftsorientierter Perspektive betrachtet – stets ansteigende Temperaturen verursachen wird, gewinnen WP immer mehr an Bedeutung in modernen und gut gedämmten Gebäuden. Das bedeutet auch, dass die fossilen Energiesysteme – auch im Hinblick auf das *EEWärmeG* – der Vergangenheit angehören dürften.

Anhang

Anhang ad Kapitel 6	
.....	A-105
Anhang ad Kapitel 7	
.....	A-109

Anhang ad Kapitel 6

In den nachfolgenden Abbildungen sind Ausschnitte zu den Berechnungen aus *Kapitel 6* ersichtlich. Hierbei sind zum einen die wichtigsten Daten bzw. Ergebnisse aus der Heizlastberechnung, welche mittels der Gebäudeplanungssoftware *PlanCal Nova 10.1* durchgeführt wurde, und zum anderen die wichtigsten Schritte über die Vorgangsweise zur Bestimmung der *JAZ* der jeweiligen *WPS* unter Verwendung des Berechnungstools *JAZCalc* Version 8.0.15 veranschaulicht.

Gebäudezusammenstellung			
Musterhaus			
Wärmeverlust-Koeffizienten			
Transmissionswärmeverlust-Koeffizient	$\Sigma H_{T,e, Geb}$	=	186,78 W/K
Lüftungswärmeverlust-Koeffizient	$\Sigma H_{V, Geb}$	=	89,34 W/K
Wärmeverlust-Koeffizient für das Gebäude	H_{Geb}	=	276,12 W/K
Wärmeverluste			
Transmissionswärmeverlust nach außen	$\Phi_{T, Geb}$	=	5790,1 Watt
Lüftungswärmeverlust (Mindestluftwechsel)	$\Phi_{V, min, Geb}$	=	2769,6 Watt <input checked="" type="checkbox"/>
Lüftungswärmeverlust (Infiltration in natürlich belüfteten Räumen)	$\Phi_{V, inf, Geb} \zeta \cdot \Sigma \Phi_{V, inf}$	=	432,4 Watt <input type="checkbox"/>
Lüftungswärmeverlust (Infiltration in mechanisch belüfteten Räumen)	$\Phi_{V, inf, Geb} \zeta \cdot \Sigma \Phi_{V, inf}$	=	0,0 Watt
Lüftungswärmeverlust (mechanischer Zuluftvolumenstrom)	$\Phi_{V, su, Geb} (1 - \eta_V) \cdot \Sigma \Phi_{V, su}$	=	0,0 Watt
Abluftvolumenüberschuss	$\Phi_{V, mech, inf, Geb}$	=	0,0 Watt
Lüftungswärmeverlust	$\Phi_{V, Geb}$	=	2769,6 Watt
Gebäudeheizlast			
Netto-Heizlast	$\Phi_{N, Geb}$	=	8559,7 Watt
Zusatz-Aufheizleistung	$\Phi_{RH, Geb}$	=	0,0 Watt
Norm-Gebäudeheizlast	$\Phi_{HL, Geb}$	=	8559,7 Watt
spezifische Werte			
Beheizte Gebäudefläche	$A_{N, beheizt}$	=	236,0 m ²
spez. Heizlast je beheizte Gebäudefläche	$\Phi_{HL, Geb} / A_{N, Geb}$	=	36,3 W/m ²
Beheiztes Gebäudevolumen	$V_{N, beheizt}$	=	590,1 m ³
spez. Heizlast je beheiztes Gebäudevolumen	$\Phi_{HL, Geb} / V_{N, Geb}$	=	14,5 W/m ³
wärmeübertragende Umfassungsfläche	$A_{U, beheizt}$	=	514,5 m ²
spezifischer Transmissionswärmeverlust, bez. auf Umschließungsfläche	spez. $\Phi_{T, uW}$	=	0,4 W/(m ² ·K)

Abbildung 36: Heizlastberechnung ÖNORM EN 12831 – Gebäudezusammenstellung

Aufgrund der im Vorfeld getroffenen Grundeinstellungen in *PlanCal Nova* (Importieren der Gebäudegeometrie, Festlegung des Standortes und der Rauminnentemperatur, *U-Wert* Zuweisung bzw. Anpassungen usw.), zeigt *Abbildung 36* einen Auszug über die Ergebnisse der Gebäudezusammenstellung im Zuge der Heizlastberechnung. Die für den ökonomischen Systemvergleich wichtigen Kennwerte sind auch in *Tabelle 5* übersichtlich darge-

stellt und zusammengefasst. Die Netto-Heizlast eines gesamten Gebäudes setzt sich nach ÖNORM EN 12831 aus den Transmissions- und den Lüftungswärmeverlusten nach außen zusammen. Alle Wärmeflüsse innerhalb der Räume werden nicht berücksichtigt. In der nachfolgenden *Abbildung 37* sind die Anteile der Transmissionswärmeverluste durch die umschließenden Flächen des Gebäudes (Wände, Dach, Erdreich, Fenster und Türen) sowie die natürlichen Lüftungswärmeverluste (z.B. das Öffnen von Fenstern, Türen) ersichtlich.

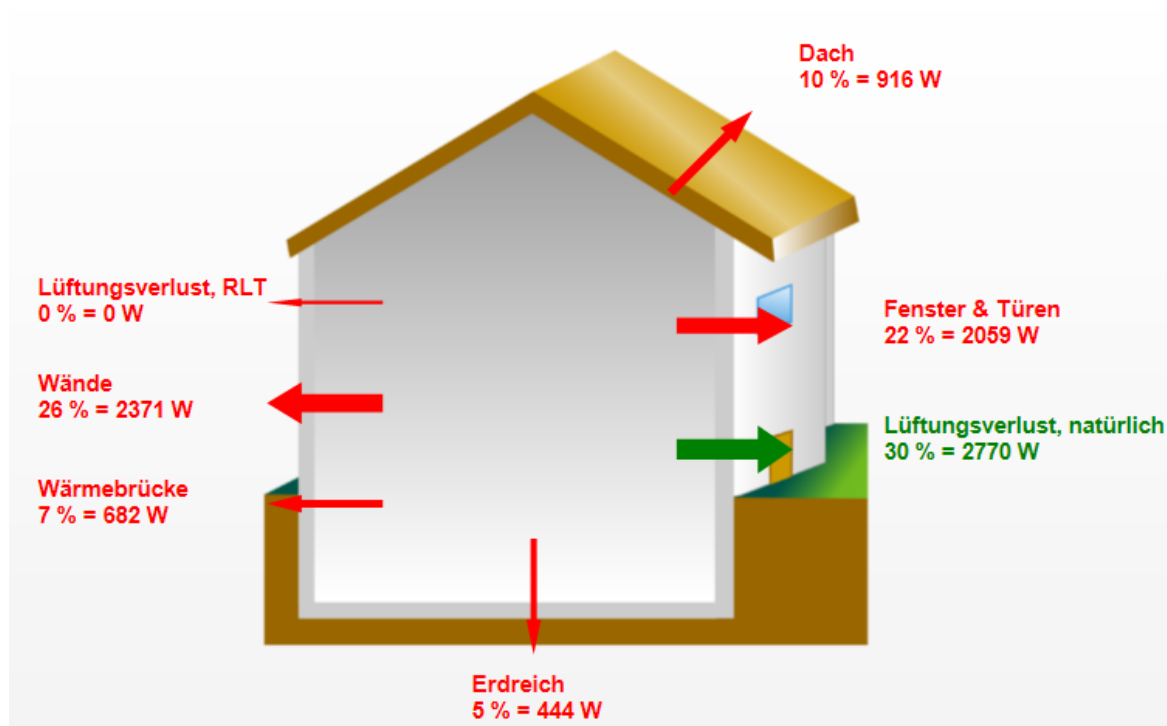


Abbildung 37: Heizlastanteile ÖNORM EN 12831

Gemäß *Abbildung 37* beträgt die Transmissionsheizlast 5790 Watt. Der Lüftungswärmeverlust beträgt 2770 Watt, wodurch sich durch Addition dieser beiden Anteile eine Netto-Gebäudeheizlast von 8560 Watt ergibt. Dieses Ergebnis ist sowohl in *Abbildung 36*, als auch in *Tabelle 5* wiederzufinden. Unter Berücksichtigung des Leistungsbedarfs für die WWB, können nun mit diesen Werten und dem zugrunde liegenden Gesamtleistungsbedarf die entsprechenden Systeme definiert und ausgelegt werden.

Abbildung 38 zeigt die Eingabeoberfläche des WP Berechnungsprogrammes *JAZCalc*, welches für die Projektierung der verschiedenen Systeme als Hilfestellung herangezogen wurde. Im ersten Schritt geht es darum, den entsprechenden Standort zu definieren und anschließend die gewonnenen Daten bzw. Ergebnisse aus der Heizlastberechnung in die gelben Pflichteingabefelder bei den Gebäudedaten zu importieren. Bei den

beigen Feldern handelt es sich um Wahleingabefelder. Wird hier kein Wert eingetragen, rechnet *JAZCalc* mit den Default-Werten. Zusätzlich berücksichtigt *JAZCalc* die Verteilverluste von Heizung und *WWB*. Hier wurden die Vorschlagswerte für das Neubau *EFH* übernommen. *JAZCalc* rechnet also aufgrund der Berücksichtigung von Verteilverlusten mit einem etwas höheren Energiebedarf als in *Tabelle 5* angeführt.




Wärmepumpen - Berechnungsblatt 2015		  	
JAZcalc Version 8.0.15		Projekt: Installeur / Planer: <i>WP Datenbank Vers. 23.04.2015</i>	
Name (Bauherr/GU):	Max Mustermann	Name:	Ing. Koppensteiner
Strasse:		Strasse:	Uttissenbach
Ort:	Tulln an der Donau	Ort:	3911 Rappottenstein
Tel.:		Tel.:	
Gebäudedaten	Energieausweis Nr.:	Bundesland:	Niederösterreich
Klimastation			Tulln
Gebäudekategorie			Einfamilienhäuser
Brutto Grundfläche BGF (gemäß Energieausweis)		A_E	m² 236
Heizwärmebedarf (gemäß Energieausweis)		$Q_{h,eff}$	kWh/m²a 65
Transmissionswärmeverluste (gemäß Energieausweis)		Q_T	kWh/m²a
Lüftungswärmeverluste (gemäß Energieausweis)		Q_V	kWh/m²a
Heizung: Zusätzliche Verteilverluste			% 10%
Sperzeiten für Wärmepumpe			h/d 0
Heizleistungsbedarf ohne Warmwasser bei -13°C	Vorschlagswert:	12,6	kW 8,6
Warmwasserbedarf Q_{WW}	manuelle Eingabe? ja	9,2	kWh/m²a 9,7
Warmwasser: Zusätzliche Speicher- und Verteilverluste			% 5%

Abbildung 38: Eingabeoberfläche von *JAZCalc* – Gebäudedaten

Die nachfolgenden Schritte zur Bestimmung der *JAZ* für Heizung und *WWB* werden am Beispiel einer Wasser-Wasser-WP vom Hersteller Vaillant in Kurzform erklärt.

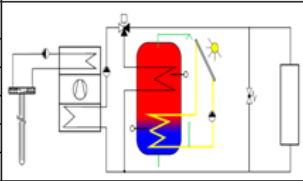
Wärmepumpen-Anlage		WP Daten von: WP-Liste		Hersteller: W/W Vaillant Austria GmbH	
Typ und Name der Wärmepumpe:		W/W 10,9kW geoTHERM VVW 81/3			
Wärmequelle und Art der Wärmepumpe		WW Wasser-Wasser-Wärmepumpe einstufig			
Einsatz (Heizung oder Warmwasser):		Heizung + Warmwasser			
Heizungsspeicher		ohne Heizungs - Speicher			
Betriebsweise der Wärmepumpen-Anlage:	monovalenter Betrieb Heizung				
Quellentemperatur:	°C				10
Rechenwerte bei TVL=35°C (Qh / COP):	-				10,9kW / 5,6
Rechenwerte bei TVL=55°C (Qh / COP):	-				9,8kW / 3,5
Elektrische Leistungsaufnahme Förderpumpe:				W	
Quellentemperatur (falls nicht 10°C)				°C	10,0
Solltemperatur wärmster Raum (z.B. Badezimmer)			$T_{i,soll}$	°C	20
Vorlauftemperatur der Heizung:	manuelle Eingabe? ja	35		TVL [°C]	35
Rücklauftemperatur der Heizung:	manuelle Eingabe? ja	30		TRL [°C]	30
Differenz Speichertemperatur - Vorlauftemperatur He	dT Speicher	0		°C	

Abbildung 39: Eingabeoberfläche von *JAZCalc*– Wärmepumpen-Anlage

Im rot markierten Bereich, siehe *Abbildung 39*, werden der Hersteller, der gewünschte Wärmepumpentyp, die Einsatzart (Heizung, WW, Heizung + WW usw.) und die Betriebsweise auf Basis der erforderlichen Heizleistung ausgewählt. Für die weitere Berechnung der JAZ wird von einer Quelltemperatur von 10°C (COP W10/W35 gemäß DIN 14511-2) ausgegangen. Ebenso sind die gewünschte Rauminnentemperatur, die VLT und die RLT der Heizung in die gelben Eingabefelder einzutragen. Der Einsatz eines Heizungs- bzw. Pufferspeichers wurde in dieser Arbeit und somit auch für die ökonomische Bewertung nicht berücksichtigt. Nachdem die wichtigsten Eingaben im Hinblick auf die Berechnung der JAZ getroffen wurden, können nun die Resultate aus der nachfolgenden *Abbildung 40* entnommen werden.

Resultate			
ungedeckter Wärmebedarf Heizung	$\epsilon =$	0,1%	
Laufzeit der Wärmepumpe			h / a 1 853
			JAZ _{HzgSolar} =
			JAZ _{WWSolar} =
			JAZ _{GesamtSolar} =
Anteil der WP und JAZ nur Heizbetrieb	$\epsilon =$	99,9%	JAZ_{Heizung} = 5,15
Anteil der WP und JAZ nur Warmwassererzeugung	$\epsilon =$	100,0%	JAZ _{Warmwasser} = 3,10
Jahresarbeitszahl (ohne Elektrozusatz) Heizung + Warmwasser (JAZ _{h+ww}):			JAZ _{ohneElektrozusatz} = 4,80
JAZ (inkl. Elektrozusatz) für Heizung und Warmwasser			JAZ_{Gesamt} = 4,77

Abbildung 40: Resultate aus der Berechnung mittels *JAZCalc*

Die Ergebnisse, die mithilfe des Berechnungstools *JAZCalc* ermittelt wurden, sind auch in *Tabelle 6* wiederzufinden. Alle restlichen WPS wurden analog, wie oben beschrieben, dimensioniert. Bei der Luft-Wasser-WP (Projektierung siehe *Kapitel 6.4*) ändern sich die Einstellwerte bzw. die Ergebnisse geringfügig, da hier ein bivalenter Betrieb vorgesehen ist und somit die Anteile der Zusatzheizung (z.B. E-Heizstab) mit zu berücksichtigen sind. Detaillierte Erläuterungen über den Programminhalt und –aufbau können bei Bedarf auf der Internetseite Qualitätsgemeinschaft Erdwärme [21] nachgelesen werden.

Anhang ad Kapitel 7

Investitionskosten [€]	
Kessel, Brenner, Regelung, Rauchrohr	4950,-
Öltank (3000 Liter)	1200,-
Montage Öltank, Zuleitungen, Verteiler Keller, Rohrleitungen, Puffer, Zubehör	2900,-
Warmwasserspeicher 150 Liter	550,-
Montage gesamt	2200,-
Nebenkosten Ölheizung:	
Tankraum, Belüftung, Brandschutztür	2200,-
Kamin (Abgassystem)	2500,-
Thermische Solaranlage 6m ² , Verrohrung, Pumpe ³⁹	4600,-
Montage	
Investitionskosten ohne <i>MwSt.</i>	21100,-
Mehrwertsteuer 20%	4220,-
Investitionskosten inkl. <i>MwSt.</i>	25320,-
Betriebskosten [€/Jahr]	
Durchschnittlicher Anlagennutzungsgrad = 75%	
Heizwert: 10 kWh/Liter Öl	
Ertrag Solaranlage: 1800 kWh	
Ölverbrauch:	
$(17570 \text{ kWh} - 1800 \text{ kWh}) / (10 \text{ kW} \times 0,75) = \text{ca. } 2105 \text{ Liter}$	
Ölpreis 0,60 €/Liter	
Energiekosten pro Jahr:	1263,-
$(2105 \text{ l} \times 0,60 \text{ €/Liter})$	
Zusatzkosten pro Jahr:	485,-
(Abgasuntersuchung, Schornsteinfeger, Tankrevision, Strom für Pumpen, Steuerung, Solaranlage)	
Betriebskosten inkl. <i>MwSt.</i>	1748,-

Tabelle 19: Zusammensetzung der *IK* und der *BK* einer Ölheizung⁴⁰

³⁹ Bei Öl- oder Gasheizungen ist gemäß *EEWärmeG* eine thermische Solaranlage vorgeschrieben.

⁴⁰ Preisangaben ohne Berücksichtigung von Kapitalverzinsungen und Energiepreissteigerungen.

Investitionskosten [€]	
Kessel, Brenner, Regelung, Rauchrohr	5260,-
Montage Brennwertkessel, Zuleitungen, Verteiler Dach, Rohrleitungen, Puffer, Zubehör	1900,-
Warmwasserspeicher 150 Liter	550,-
Montage gesamt	2200,-
Nebenkosten Gasheizung:	
Gasanschluss	1440,-
Installation	830,-
Dachleiter, Podest	200,-
Neutralisationsanlage Kondensat	200,-
Thermische Solaranlage 6m ² , Verrohrung, Pumpe ⁴¹	4600,-
Montage	
Investitionskosten ohne <i>MwSt.</i>	17180,-
Mehrwertsteuer 20%	3436,-
Investitionskosten inkl. <i>MwSt.</i>	20616,-
Betriebskosten [€/Jahr]	
Durchschnittlicher Anlagennutzungsgrad = 85%	
Heizwert: 10 kWh/m ³ Gas	
Ertrag Solaranlage: 1800 kWh	
Gasverbrauch:	
$(17570 \text{ kWh} - 1800 \text{ kWh}) / (10 \text{ kW} \times 0,85) = \text{ca. } 1855 \text{ m}^3$	
Gaspreis 0,559 €/m ³	
Energiekosten pro Jahr:	1037,-
$(1855 \text{ m}^3 \times 0,559 \text{ €/m}^3)$	
Zusatzkosten pro Jahr:	485,-
(Abgasuntersuchung, Schornsteinfeger, Tankrevision, Strom für Pumpen, Steuerung, Solaranlage)	
Betriebskosten inkl. <i>MwSt.</i>	1522,-

Tabelle 20: Zusammensetzung der *IK* und der *BK* einer Gas-BWH⁴²

Die Preise – anhand der oben ersichtlichen Tabellen (*Tabelle 19* und *Tabelle 20*) – wurden mittels der Daten aus [29] erstellt. Bei den *IK* handelt es sich Durchschnittswerte, die je nach Gerätetyp und Hersteller nach oben bzw. nach unten abweichen können. Sie haben

⁴¹ Bei Öl- oder Gasheizungen ist gemäß *EEWärmeG* eine thermische Solaranlage vorgeschrieben.

⁴² Preisangaben ohne Berücksichtigung von Kapitalverzinsungen und Energiepreissteigerungen.

Gültigkeit in Bezug auf ein *EFH* mit einer Heizleistung von 7,5 kW [29]. Da das in *Kapitel 6* dimensionierte Musterhaus aber mindestens 9,76 kW für die Deckung des Energiebedarfs (Heizung und *WW*) benötigt, würde dies bedeuten, dass die oben angegebenen *IK* der fossilen Energiesysteme tendenziell noch etwas höher liegen würden. Für den Amortisationsvergleich – siehe *Kapitel 7.5* – wird jedoch mit den Beträgen für die 7,5 kW Anlagen gerechnet. Dadurch kann im Regelfall von einer noch kürzeren Amortisationszeit der *WPS* ausgegangen werden.

Bei den *BK* hingegen wurden die Daten aus [29] entsprechend des Gebäudewärmebedarfs nach *Tabelle 5* hochgerechnet und anschließend mit dem Online Heizkostenrechner von [30] abgeglichen. Dabei konnten sehr ähnliche Ergebnisse (siehe *Abbildung 41* und *Abbildung 42*) im Vergleich zu *Tabelle 19* und *Tabelle 20* erzielt werden.

ÖLHEIZUNG

Durchschnittl. AL - Nutzungsgrad bei Öl: %

Ölpreis: €/l

Heizwert: kWh/l

Der Nutzungsgrad ist bei Warmwasserbetrieb im Sommer schlechter als bei Heizbetrieb!

Öl Verbrauch: $\frac{\text{Jahresenergiebedarf}}{\text{Heizwert} \times \text{Nutzungsgrad}} = \text{Jahresölverbrauch}$

kWh = l

kWh/l

Ölkosten p.a. l x €/l = €

Nebenkosten, Messpreis €

Abbildung 41: Betriebskosten einer Ölheizung (entnommen aus [30])

GASHEIZUNG

Durchschnittl. AL - Nutzungsgrad bei Erdgas: %

Erdgaspreis: €/l

Heizwert: kWh/l

Der Nutzungsgrad ist bei Warmwasserbetrieb im Sommer schlechter als bei Heizbetrieb!

Erdgas Verbrauch: $\frac{\text{Jahresenergiebedarf}}{\text{Heizwert} \times \text{Nutzungsgrad}} = \text{Jahresgasverbrauch}$

kWh = l

kWh/l

Erdgaskosten p.a. l x €/l = €

Nebenkosten, Messpreis €

Abbildung 42: Betriebskosten einer Gas-BWH (entnommen aus [30])

Glossar

Amortisationszeit	„Die tatsächliche Amortisationszeit ist die Anzahl Jahre, die man benötigt, um den Kapitaleinsatz einer Investition (=Anschaffungsauszahlung, gegebenenfalls um den Restwert vermindert) aus den Rückflüssen (Nettoeinzahlungen) wiederzugewinnen.“ [26] S. 212
Betrachtungszeitraum	Rechengröße, auf die die Gesamtkosten einer Investition bzw. einer Energiesparmaßnahme bezogen und bewertet werden. Der <i>Betrachtungszeitraum</i> sollte dabei so gewählt werden, dass dieser überschaubar ist; dieser kann im Einzelfall zwischen 3 und 50 Jahren liegen [28] S. 4.
BIV	Unter dem <i>BIV</i> versteht man den gesamten Energiebedarf eines Landes, vor der Umwandlung in Kraftwerken, Heizwerken, Raffinerien etc. „Darin enthalten sind die Eigenerzeugung von Rohenergie, die Salden des Außenhandels sowie die Lagerveränderungen.“ [8] S. 4.
EEV	„Der energetische Endverbrauch bezeichnet jene Energiemengen, die dem Verbraucher (Haushalte, Gewerbe und Industrie, Verkehr, Dienstleistungen) tatsächlich für die Umsetzung in Nutzenergie zur Verfügung stehen.“ Bspw. Treibstoffe für die Automobilindustrie, Gas und Heizöl für die Raumwärme etc. Der <i>EEV</i> umfasst somit alle umgewandelten Energieformen. Der wesentliche mengenmäßige Unterschied zwischen <i>BIV</i> und <i>EEV</i> sind die Umwandlungsverluste [8] S. 4.
EEWärmeG	Nach dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz soll der Bauherr zur Nutzung von erneuerbarer Energie im Wärmebereich bewegt werden. In Neubauten ist es daher gesetzlich verpflichtend, einen gewissen Anteil des Wärmebedarfs durch erneuerbare Energien, z.B. Solaranlagen oder Photovoltaik, zu erzeugen. Der Hintergrund liegt u.a. im Interesse des Klimaschutzes [12] S. 18.
EnEV	„Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“. Mit der <i>EnEV</i>

gibt die Bundesregierung energetische Mindeststandards für Wohn- und Nichtwohngebäude vor [19] S. 144.

Enthalpie h

Diese Größe wird als kalorische Zustandsgröße bezeichnet und kann mit Hilfe der kalorischen Zustandsgleichung berechnet werden. So kann die Enthalpie h mittels einer Gleichung berechnet werden, in der die Temperatur T und der Druck p als Variablen vorkommen ($h=h(T,P)$) [5] S. 6.

Entropie s

Die Entropie ist eine wichtige Zustandsgröße des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Es handelt sich um eine kalorische Zustandsgröße, die es ermöglicht, die Irreversibilität einer Zustandsänderung rechnerisch zu erfassen. „Bei allen irreversiblen Prozessen wird Entropie erzeugt. Nur im Grenzfall reversibler Zustandsänderungen verschwindet dieser Entropieterm.“ [5] S. 17

EVU-Sperrzeiten

WP werden i.d.R. mit einem vergünstigten Stromtarif betrieben. Die Nutzung dieser Sondertarife der jeweiligen örtlichen *EVUs* bedingt oft eine unterbrochene Betriebsweise. So kann z.B. die Stromzufuhr für max. 2x3 Stunden in einem Zeitraum von 24 Stunden unterbrochen werden. Es müssen daher entsprechende Leistungsreserven bei der Auslegung der *WP* berücksichtigt werden, um diese Sperrzeiten, in denen kein Strom verfügbar ist, zu kompensieren [2] S. 40.

Isentrope $Z\ddot{A}$

Wenn die Entropie s konstant ist, spricht man von einer isentropen $Z\ddot{A}$. „Bei dieser Zustandsänderung erfolgt kein Wärmeaustausch mit der Umgebung und sie verläuft reversibel. Zusätzlich werden die innere Reibung und die dadurch entstehende Reibungswärme vernachlässigt.“ [24] S. 72. Im T-S-Diagramm entspricht die Isentrope $Z\ddot{A}$ einer vertikalen Linie, da $s = \text{konstant}$.

Isotherme $Z\ddot{A}$

Wenn die Temperatur T konstant ist, spricht man von einer isothermen $Z\ddot{A}$ [24] S. 70. Im T-S-Diagramm entspricht die Isotherme $Z\ddot{A}$ einer horizontalen Linie, da $T = \text{konstant}$.

JAZCalc

Es handelt sich um ein Online-Berechnungstool zur Auslegung von *WPA*. Mit diesem Programm „können bereits im Planungsstadium wichtig Kennzahlen – allen voran die Jahresarbeitszahl *JAZ* und der Strombedarf einer *WPA* – mit hoher Genauigkeit berechnet werden.“ Das Berechnungsmodell greift auf die neu überarbeitete Norm SIA 384/3 zurück und

bezieht Messpunkte nach der Prüfnorm EN14511 mit ein. Die neue Version V8 wurde auf österreichische Verhältnisse adaptiert [21].

Kreisprozess

„Wird einem thermodynamischen System Energie (Wärme, Arbeit) zugeführt oder entzogen, so ändert sich der physikalische Zustand des Systems.“ Ein *Kreisprozess* ist durch die Aufeinanderfolge mehrerer Zustandsänderungen, die nach Ablauf des Prozesses wieder ihren Ausgangszustand erreichen, charakterisiert. „Durch geeignete Prozessgestaltung kann dabei Wärme in Arbeit (Wärmekraftmaschinen) oder Arbeit in Wärme (Kältemaschinen, Wärmepumpen) umgewandelt werden.“ [31] S. F 17

Nutzungsdauer

Sie ist per Definition „[d]er Rechnung zugrunde gelegte Zeitraum der Nutzung einer Komponente.“ Grundsätzlich kann man zwischen rechnerischer und tatsächlicher *Nutzungsdauer* unterscheiden. „Die rechnerische Nutzungsdauer stellt einen Erfahrungswert dar und beginnt mit der erstmaligen Inbetriebnahme der Anlage. Die tatsächliche Nutzungsdauer kann davon nach oben und unten abweichen.“ [28] S. 6

PlanCal Nova

Dies ist eine CAD-Software, die speziell für die Gebäudetechnik entwickelt wurde. Die zweidimensionalen Architektenpläne werden in *PlanCal Nova* importiert, um anschließend die gebäudespezifischen Berechnungen mit nur wenigen Schritten direkt im CAD-Programm durchführen zu können. Es können u.a. *U-Wert* Vorgaben bzw. Anpassungen, Heizlastberechnungen, Rohrnetzberechnungen, Kühllastberechnungen u.v.m. abgearbeitet werden [13].

Polytrope ZÄ

„Bei der polytropen Zustandsänderung verändern sich alle thermischen Zustandsgrößen wie p [Druck], V [Volumen] und T [Temperatur]. Zusätzlich wird Wärme zu- bzw. abgeführt, so dass sich die Temperatur des Systems proportional ändert.“ [24] S. 77.

U-Wert

Der *U-Wert* ist ein Maß des Wärmedurchgangs durch die Bauteile (Fenster, Türen, Außenwände) eines Gebäudes. Seine Einheit ist W/m^2K und gibt an, wie viel Energie durch einen Quadratmeter eines Bauteils bei einem Kelvin Temperaturdifferenz von innen nach außen (sprich von der beheizten zur unbeheizten Seite) abgegeben wird [19] S.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt: Energieeinsatz in Österreich. URL: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/energie/energie_austria/>, 2015
- [2] Ochsner, Karl: Wärmepumpen in der Heizungstechnik: Praxis-handbuch für Installateure und Planer. – 5., überarbeitete und erweiterte Aufl. – Heidelberg: C.F. Müller Verlag, 2014
- [3] Statistik Austria: Vorläufige Energiebilanz 2014. URL: <http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html>, 2015
- [4] Statistik Austria: Gesamtenergieeinsatz der Haushalte. URL: <http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/index.html>, 2015
- [5] Payer, Hans-Jörg: Skriptum Technische Wärmelehre. – Hollabrunn, HTBLu.VA für Maschinenbau , 2014
- [6] Ochsner Wärmepumpen: Reichweite der Primärenergieträger. URL: <<http://www.ochsner.com/de/ihr-nutzen/komfort/>>, 2014
- [7] Geothermie-Nachrichten: Erdgekoppelte Wärmepumpen - Technik, Anforderungen, Perspektiven. URL: <<http://www.geothermie-nachrichten.de/erdgekoppelte-waermepumpen-technik-anforderungen-perspektiven-2>>, 2014
- [8] E-Control: Infoblatt „Aktuelle Daten, Begriffe, Marktakteure“. URL: <http://www2.e-control.at/portal/page/portal/PEE_HOME/UNTERRICHT/UNT_WEGSTROM/UNT_WEGSTROM_VERTI NFOS1/MODUL2_PDF_22.pdf>, 2010
- [9] Bundesverband Wärmepumpen e.V.: Funktionsweise Wärmepumpe. URL: <<http://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion.html>>, 2015
- [10] Bartl Wärmepumpen: Die Wärmepumpe. URL: <<http://www.bartlwp.de/technik/waermepumpe.html>>, 2015

- [11] Kunz-Beratungen: Wärmepumpen und Kältetechnik II. URL: <http://kunz-beratungen.ch/wordpress/wp-content/uploads/2015/05/WP-_und_Kaeltetechnik_II.pdf>, 2015
- [12] Schulz, Marion; Westkämper, Hubert: Die neue Heizung: Umweltfreundlich und wirtschaftlich heizen mit Gas, Holz, Strom und Sonnenenergie. – 2. verbesserte Aufl. – Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag, 2013
- [13] PLANCAL: nova – Haustechnik-Lösung auf dem neuesten Stand. URL: <<http://www.plancal.de/at/produkte/nova.html>>, 2012
- [14] Hartig, Ralf: 7. Grundlagen der Wärmepumpentechnik. – Mittweida, Hochschule, Institut für Energiemanagement, 2014
- [15] Kelag: Wärmequellen für Wärmepumpen. URL: <http://haushalte.kelag.at/content/page_waermepumpe-16944.jsp>, 2015
- [16] Fellbach-Solar: Solarstrombetriebene Wärmepumpe. URL: <<http://www.fellbach-solar.de/Waermepumpe/waermepumpe.html>>, 2015
- [17] Bonin, Jürgen: Handbuch Wärmepumpen: Planung und Projektierung. – 2., überarbeitete und erweiterte Aufl. – Berlin: Beuth Verlag, 2012
- [18] Sobotta, Stefan: Praxis Wärmepumpen: Technik, Planung, Installation. – 2., überarbeitete und erweiterte Aufl. – Berlin: Beuth Verlag, 2015
- [19] Königstein, Thomas: Ratgeber energiesparendes Bauen und Sanieren: Neutrale Fachinformationen für mehr Energieeffizienz. – 6., aktualisierte und erweiterte Aufl. – Taunusstein: Blottner Verlag, 2014 – Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014
- [20] Nachhaltig Wirtschaften: Innovative Energietechnologien in Österreich – Marktentwicklung 2014. URL: <<http://www.nachhaltigwirtschaften.at/iea/results.html/id8077>>, 2014
- [21] Qualitätsgemeinschaft Erdwärme: JAZCalc. URL: <<http://www.erdwaerme-info.at/proficer/jazcalc/>>, 2013
- [22] Vaillant Austria GmbH: Produktkatalog. URL: <<https://www.vaillant.at/downloads/bro/geotherm-140716-153868.pdf>>, 2014

- [23] Jahresarbeitszahlen: Der Temperaturhub. URL: <<http://www.jahresarbeitszahlen.info/index.php/einfluesse/temperaturhub>>, 2010
- [24] Steger, Hans; Sieghart, Johann; Glauninger, Erhard: Technische Mechanik. – 5. Auflage. – Wien: Öbvht Verlag, 2006
- [25] Durchblicker: Strom-Preisvergleich. URL: <<https://durchblicker.at/strom/evn>>, 2015
- [26] Däumler, Klaus-Dieter; Grabe, Jürgen: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. – 13. vollständig überarbeitete Aufl. – Herne: NWB Verlag, 2014
- [27] Thurner, Wolfgang: Skriptum Entwicklung gebäudetechnischer Anlagen – Kapitel 6 Wirtschaftlichkeit. – Hollabrunn, HTBLu.VA für Maschinenbau , 2015
- [28] VDI 2067 Blatt 1. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. Düsseldorf, 2012
- [29] Klima Innovativ: Heizkostenvergleich und Investitionskostenvergleich Ölheizung, Gasheizung, Pelletheizung und Wärmepumpen Erdkollektor, Grundwasser sowie Erdkollektor mit Photovoltaikanlage. URL: <<http://www.klima-innovativ.de/pages/kosten.html>>, 2015
- [30] Ochsner Wärmepumpen: Heizkostenrechner. URL: <<http://www.ochsner.com/de/heizkostenrechner/>>, 2014
- [31] Böge, Alfred: Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendung der Maschinenbau-Technik. – 8., vollständig neu bearbeitet Auflage. – Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2004
- [32] Umweltbundesamt: Erneuerbare Energieträger. URL: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/energie/energie_austria/>, 2015
- [33] Ochsner Wärmepumpen: Funktionsweise – Das Prinzip der Wärmepumpe. URL: <<http://www.ochsner.com/de/die-waermepumpe/funktionsweise/>>, 2014

Wichtige Normen, Richtlinien

Österreich: Ö-Norm

EN 12831, 01.12.2003: Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast

Richtlinie 2009/28/EG: zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

Deutschland:

VDI 4640 Blatt 1, 06.2010: Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte

VDI 4650 Blatt 1, 11.2014: Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen, Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung

VDI 2067 Blatt 1, 09.2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung

Schweiz:

SIA 380-1, 2009: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden

SIA 384-2, 1982: Wärmeleistungsbedarf von Gebäude

SIA 384-3, 2013: Heizungsanlagen in Gebäuden – Energiebedarf

Europa:

DIN EN 14511-2, 12.2013: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumheizung und –kühlung – Teil 2: Prüfbedingungen

DIN EN 255: Wärmepumpen; anschlussfertige Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zum Heizen oder zum Heizen und Kühlen

DIN EN 255-3, 01.04.1998: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Heizen – Teil 3: Prüfungen und Anforderungen Brauchwasserwärmepumpen (gekürzt)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Uttissenbach, den 15. Jänner 2016